

論文 膨張材およびビニロン短繊維を用いたコンクリートのひび割れ特性に関する実験的研究

玉置 一清^{*1}・睦好 宏史^{*2}・浅本 晋吾^{*3}・三上 浩^{*4}

要旨：本研究は、経済的なひび割れ制御の一方策として、収縮補償レベルの膨張材量および少量のビニロン短繊維混入の有効性を検証する目的で、一軸鉄筋拘束試験体を実環境下で暴露した後、引張試験を実施したものである。検討の結果、膨張材の効果は5ヶ月後においても持続し、定量的な評価が可能であること、ビニロン短繊維を少量混入した場合、テンションステフィニング効果としてはばらつきがあるものの、微細な初期ひび割れの影響を緩和する効果があることなどが明らかになった。

キーワード：膨張材, ビニロン短繊維, 初期ひび割れ, 鉄筋拘束応力

1. はじめに

設計荷重時にひび割れを許さないPCに対し、PRCはひび割れを許容範囲まで制御することにより、構造物の初期建設コストの削減を図る合理的な設計手法として注目されている。PRCの概念は、決して新しいものではなく、Ablesらが1940年代にパーシャリー・プレストレストコンクリート(PPC)を提案し、また国内では1965年に横道らの設計により世界初のPRCとなる上姫川橋が建設されている。しかし、その後、現在に至るまで、ひび割れ照査技術、特に乾燥収縮の影響の不明確さ等が一つの要因となり、本格的な普及には至っていないのが現状である。また、ひび割れ発生後のひび割れ幅を制御する方策としては、鉄筋配置によるのが一般的であるが、過密な鉄筋の配置はコンクリートの充填性など、施工性の障害となるばかりでなく、コンクリートの収縮を拘束することにより、逆に早期のひび割れ発生を誘引することになり得る。

そこで、本研究は、鉄筋コンクリートのひび割れ発生に及ぼす乾燥収縮の影響を検証するとともに、初期ひび割れの抑制およびひび割れ幅制御の一方策として、コンクリートの材料面か

ら、低添加型膨張材およびビニロン短繊維の有効性について検証を行ったものである。これらの材料に関しては、これまで試験室レベルで数多くの研究成果が報告されており、その有効性が確認されているが、本研究では、実物大サイズの部材を用い、屋外環境下において検証を行うことを特徴とし、写真-1に示す断面500×400mm×桁長4mで、鉄筋比がそれぞれ0.8%、1.7%、4.8%となるPC、PRC、RC梁を作製した。現時点で約5ヶ月間の暴露を継続中であり、材齢1年後に載荷試験を実施する予定である。

本報告は、この梁試験体の挙動解析用の基礎物性データ採取を目的として、大型梁試験体と同時に作製した鉄筋単体の拘束試験体を、材齢1ヶ月および材齢5ヶ月で一軸引張試験した結果について報告を行うものである。



写真-1 試験体の暴露状況

*1 三井住友建設(株) 技術研究所 主任研究員 工修 (正会員)

*2 埼玉大学大学院理工学研究科 教授 工博 (正会員)

*3 埼玉大学大学院理工学研究科 助手 博(工) (正会員)

*4 三井住友建設(株) 技術研究所 主席研究員 博(工) (正会員)

2. 実験概要

2.1 コンクリートの配合および養生

本実験に使用したコンクリートの配合を表-1に示す。S配合は、PC部材で一般的に使用されている早強セメントを用い、高性能AE減水剤の採用により単位水量を 160kg/m^3 としたもので、耐久性としては標準以上と考えられている配合である。SE配合は、収縮補償レベルとしてセメントの 20kg/m^3 を低添加型エトリンガイト・石灰複合系膨張材に置き換えたものであり、ひび割れ発生までの抵抗性を高めることを目的としたものである。SV配合は、体積比0.4%のビニロン短繊維を混入することにより、ひび割れ幅の拡大に対し抵抗性を高めることを目的としたものである。使用したビニロン短繊維の諸元を表-2に示す。SEV配合は、先の低添加型膨張材およびビニロン短繊維の両方を同時に添加したものである。ここで、ビニロン短繊維混入率を0.4%と比較的低いレベルとした理由は、コスト縮減を目的とした研究意図から、コンクリート材料費の上昇率を1.5倍までとする制約から決定したものである。コンクリートの打込みは、大型梁も同時に作製した都合上、1日に1種類とした。表-3に、打込み時のフレッシュ性状を示す。打込み後の養生は、材齢3日までは養生マットを被せ、常時散水を施し、材齢3日以降から乾燥を開始している。

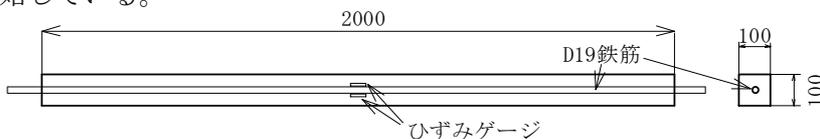


図-1 鉄筋拘束応力試験体

表-1 コンクリートの配合

配合名	配合 (kg/m^3)						
	セメント	膨張材(E)	水	細骨材	粗骨材	混和剤	短繊維(V)
S	377	-	160	805	974	3.77	-
SE	357	20					
SV	377	-					
SEV	357	20				4.52	5.2

表-2 ビニロン短繊維の諸元

	単位	
直径	mm	0.66
標準長さ	mm	30
比重	g/cm^3	1.3
引張強度	N/mm^2	880
ヤング率	kN/mm^2	29.4

暴露環境は、写真-1に示すよう大型梁同様、すべて屋外としているが、直射日光の影響は今後の課題とするものとし、今回は屋根設備を設置した日陰下に暴露をした。

2.2 試験方法

表-4に、基本物性採取用に実施した試験体の種類および寸法を示す。図-1に、鉄筋拘束応力試験体の寸法を示す。

表-4 試験体の種類および寸法

目的	試験項目	寸法 (mm)
強度試験	圧縮強度	$\phi 100 \times 200$
	割裂強度	$\phi 150 \times 200$
	曲げ強度	$\square 100 \times 400$
経時変化	自由膨張収縮	$\square 100 \times 400$
	クリープ	$\square 100 \times 400$
	鉄筋拘束応力	$\square 100 \times 2000$
ひび割れ評価	材齢1および5ヶ月で一軸引張試験	

自由膨張収縮試験および簡易クリープ試験は、同一サイズ($100 \times 100 \times 400$)とし、埋込みゲージにより1時間ピッチでひずみデータを採取している。クリープ試験状況を写真-2に示す。ヤング係数がほぼ一定となる材齢3日時に、拘束ボルトで 5N/mm^2 の圧縮応力を与えたものであるが、厳密には応力一定ではなく、ロードセルにより圧力を管理し、 $\pm 0.5\text{N/mm}^2$ 以内に収まるよう手動調整を行った。



写真-2 簡易クリープ試験

表-3 コンクリートのフレッシュ性状

	S	SE	SV	SEV
打設日 (2006年)	7/31	8/2	8/1	8/4
打込み時の気温	29.1°C	24.0°C	25.4°C	27.7°C
コンクリート打込み温度	29.4°C	27.6°C	26.9°C	32.0°C
スランプ	11.5cm	13.0cm	14.0cm	13.5cm
空気量	4.0%	4.0%	4.5%	3.3%

鉄筋拘束試験体の寸法は、JCI で提案されている自己収縮応力試験を参考に、断面寸法を 100×100 とし、体積表面積比 V/S は、自由膨張収縮試験体にほぼ等しい。鉄筋径は D19 と D32 の 2 種類を作製したが、紙面の制約から、今回は D19 についてのみ報告する。鉄筋拘束試験体は 1 セットを 2 体とし、3 セット作製し、材齢 1 ヶ月、5 ヶ月に分けて、鉄筋に強制的に引張力を与え、ひび割れを発生させた。残りの 1 セットは現在も暴露中であり、材齢 1 年で引張試験を実施する予定である。

3. 実験結果

3.1 強度試験結果

表-5 に、圧縮強度、割裂強度、曲げ強度試験結果の一覧を示す。強度試験結果を見るかぎり、膨張材、ビニロン短繊維添加による差異は特に現れていない。材齢 1 ヶ月に比べ、材齢 5 ヶ月では 10~20%程度の強度増進が確認された。

表-5 強度試験結果

		圧縮強度 (N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
S	材齢28日	46.1	3.2	5.2	31.0
	材齢5ヶ月	53.5	3.7	6.1	32.7
SE	材齢28日	47.6	3.7	5.2	31.9
	材齢5ヶ月	52.0	3.9	5.6	33.5
SV	材齢28日	47.5	3.4	5.6	28.1
	材齢5ヶ月	55.4	4.0	6.3	30.2
SEV	材齢28日	50.5	3.7	5.7	31.2
	材齢5ヶ月	60.0	4.3	7.0	32.5

3.2 経時変化

(1) 無筋コンクリートの自由膨張収縮 およびクリープ

図-2 に試験地域の日降水量(気象庁)および平均湿度を、図-3 に自由膨張収縮ひずみを示す。自由膨張収縮ひずみは、凝結開始となる打込み 6 時間後を初期値とし、気温変化等による線膨張ひずみは控除している。材齢 1 ヶ月程度までは、膨張材の有無によって、200 μ 程度の収縮差があったが、さらに長期になると SV 配合を除いてあまり差異の無い収縮量となっている。9/6 以降の強雨の影響で、SV 配合を除いて大きく膨張傾向を示している。ここで、SV 配合のみが膨張しなかった理由がビニロン短繊維に起因するもので

あるとは考え難く、降雨時の暴露環境を調査したところ、屋根の下ではあるが、側面からの吹込みや屋根からの雨漏れ等により、SV 配合を除くすべての試験体の表面がほぼ完全に湿潤状態にあったが、SV 配合のみが、大型試験体の影に入り、直接雨滴を受けていないことが分かった。後述するクリープ試験体および鉄筋拘束試験体のひずみは、短繊維の有無に関わらず、S,SV 配合ともほぼ一致していることから、本項以降、SV 配合の自由収縮ひずみも S 配合と同じであったとして考察を行うものとした。

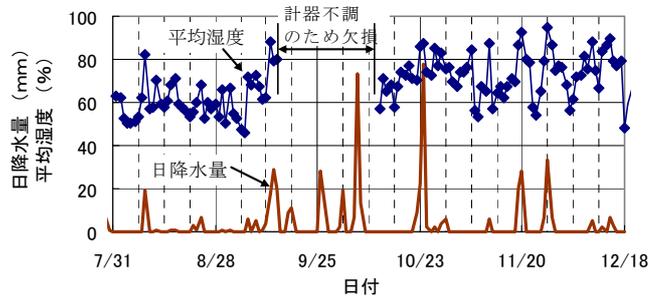


図-2 試験地域の降水量および平均湿度

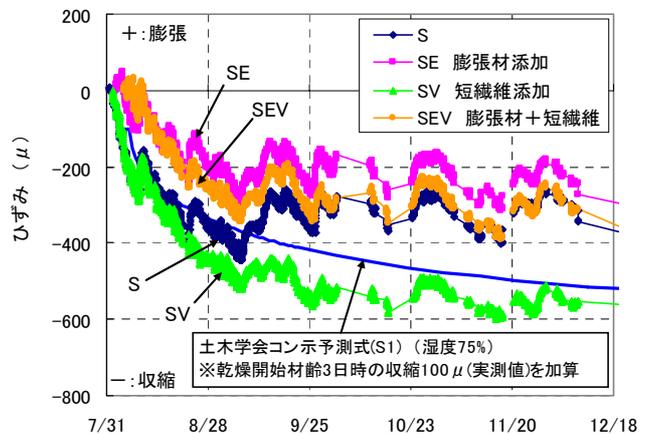


図-3 自由膨張収縮ひずみ (100×100×400)

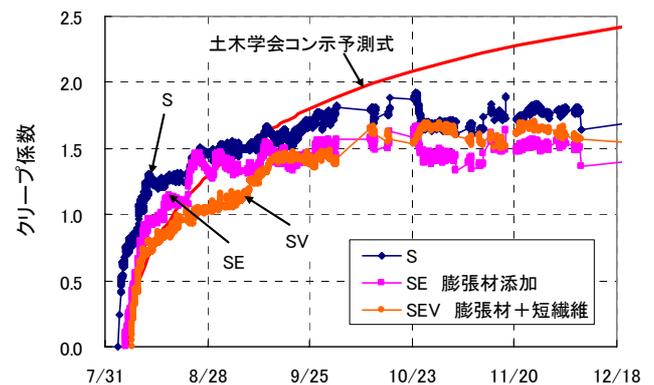


図-4 クリープ係数 (100×100×400)

図-4 に、簡易クリープ試験体と自由膨張収縮試験体のひずみデータの差分をクリープひずみとし、載荷応力による弾性ひずみで除したクリープ係数の推移を示す。クリープ係数は、膨張材、ビニロン短繊維添加の有無に関わらず、同程度であることがわかった。参考までに図-3, 4 中に、土木学会コンクリート標準示方書[2002年]¹⁾(以下、コン示)の収縮およびクリープの予測値を示す。平均湿度は75%一定としている。体積表面積比V/Sが100mm以下の本試験体は適用範囲外であるが、比較的良好に予測できていることがわかる。

(2) 鉄筋コンクリートのひずみ経時変化

D32 拘束試験体では、材齢 20 日程度で、膨張材を添加していない S 配合および SV 配合で、初期ひび割れの発生が確認されたが、D19 試験体では、材齢 5 ヶ月時点では、いずれの配合も目視においては初期ひび割れを確認することはできなかった。図-5 に、D19 鉄筋の拘束ひずみを示す。鉄筋ひずみは、打込み直後を初期値としている。自由収縮ひずみ同様、材齢 1 ヶ月程度までは、膨張材有無の差異が明確であったが、長期材齢では、顕著な差異は無くなっている。図中、矢印で示した材齢時に、S, SE および SV 配合の鉄筋ひずみが緩やかに解放されており、目視では確認することはできない程度の微細なひび割れの発生が考えられる。SEV 配合のみは、現時点まで、鉄筋ひずみの解放は発生していない。

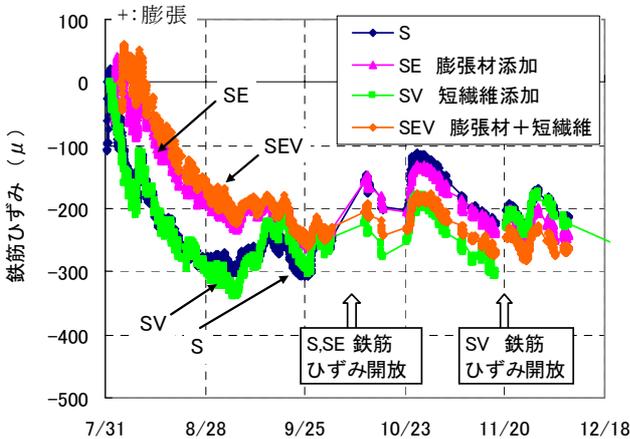


図-5 鉄筋拘束試験体(D19)の鉄筋ひずみ

(3) 鉄筋コンクリートに生じる平均応力

コンクリートの収縮膨張によって鉄筋拘束試験体に生じるコンクリート平均応力は、鉄筋に生じる圧縮力とコンクリートに生じる引張力が釣り合うという条件式から、式(1)として求めることができる。ここで、鉄筋ひずみの算定が必要となるが、文献 2)に示す無筋コンクリートの収縮ひずみとクリープ係数及び鉄筋比を用いた式(2)より推定²⁾を行い、実測値と比較する。

$$\sigma_c = \varepsilon_s(t) \cdot E_s \cdot \rho_s \quad (1)$$

$$\varepsilon_s(t) = \frac{\varepsilon_{c0}(t)}{1 + E_s / E_c(t) (1 + \phi_c(t) / 2) \rho_s} \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon_s(t)$: 鉄筋のひずみ

$\varepsilon_{c0}(t)$: 無筋コンクリートのひずみ

$\phi_c(t)$: コンクリートのクリープ係数

$E_c(t)$: コンクリートの弾性係数

E_s : 鉄筋の弾性係数

ρ_s : 鉄筋比

本実験では、長期材齢時の挙動に主眼を置いているため、弾性係数がまだ一定になっていない若材齢時のクリープ試験は実施していない。そこで、今回は、材齢 3 日までのコンクリート応力の推定に関しては、今後の課題とするものとし、今回は、材齢 3 日までのコンクリート応力は、鉄筋ひずみの実測値を直接用いた式(1)により求め、これを材齢 3 日以降の推定値に加算して検証を行うこととした。

図-6 に、打込み直後から材齢 3 日までの鉄筋ひずみの実測値を式(1)に代入した結果を示す。参考として図-7 に、鉄筋比 1.7%の大型 PRC 梁において、配置鉄筋の全ひずみ実測値から同様に推定したコンクリート応力の推定結果を示す。□100mm の小型試験体では、若材齢時における散水養生程度では既に乾燥収縮の影響が始まっているものと考えられ、これを定量的に評価することは困難である。しかし、大型梁のデータを見ると、散水養生中の乾燥の影響は少なく、膨張材無添加の S 配合では自己収縮応力として、膨張材添加の SE(SEV)配合は自己収縮応力+ケ

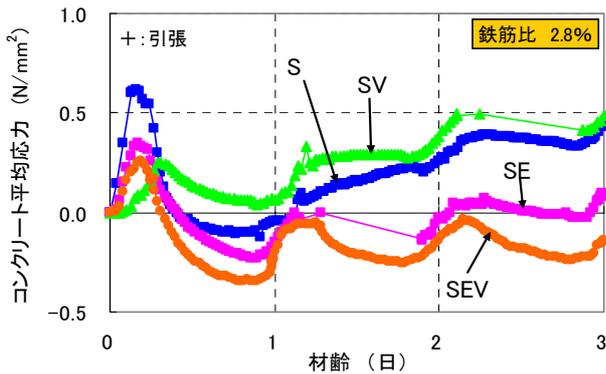


図-6 打込み直後から材齢3日までの
コンクリート平均応力 (□100mm)

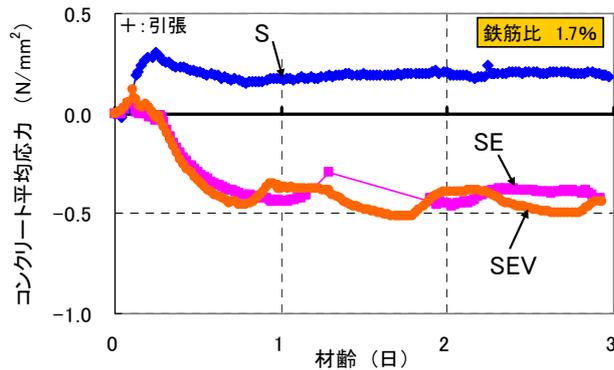


図-7 鉄筋比 1.7%の大型梁 (断面 500×400)
のコンクリート平均応力

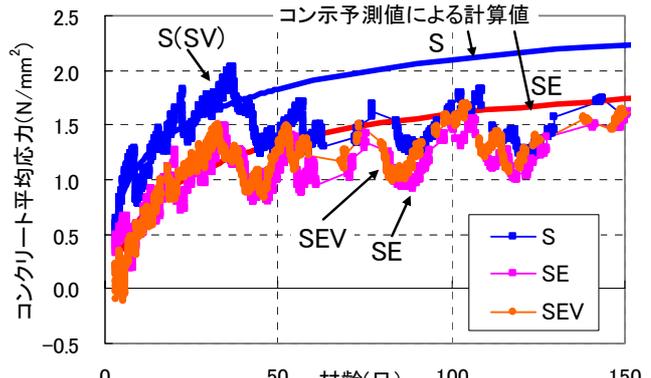


図-8 無筋コンクリートのひずみに基づく
コンクリート平均応力推定値

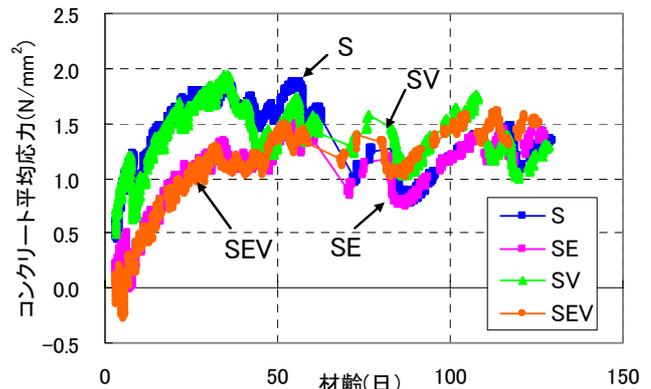


図-9 鉄筋ひずみ実測値に基づく
コンクリート平均応力推定値

ミカルプレストレスとしての定量的評価が可能であると考えられる。現在、若材齢時のクリープ係数の設定を最重要課題とし、材齢3日までの若材齢時応力の定量的評価に取り組んでいる。

図-8に、材齢3日以降のコンクリート応力について、自由膨張収縮ひずみおよびクリープ係数の実測値から、式(1)および式(2)により求めた計算結果を示す。コンクリートの弾性係数は $E_c=31\text{kN/mm}^2$ 一定としている。図中に、コン示¹⁾の予測値のみを用いて、材齢3日以降の筋拘束応力を推定した結果を太実線で示す。SとSEの相違は、材齢3日までの応力のみで、それぞれ図-6に示す実測値を加算している。また、図-9に鉄筋ひずみの実測値を式(1)に直接代入した結果を併せて示す。両者は定量的にもよく一致しており、無筋コンクリートの自由収縮ひずみ及びクリープ係数が十分な精度で予測できれば、式(1)および(2)を用いて、鉄筋コンクリートの収縮拘束応力が推定可能であることを示している。

3.3 暴露後の一軸引張試験

図-10に材齢28日および材齢5ヶ月時の一軸引張試験時の鉄筋ひずみを示す。鉄筋ひずみは、載荷直後はコンクリート全断面有効としての剛性で増加していくが、ひび割れ発生後は、鉄筋単体のひずみに近づいていくことになる。ここで、載荷直前の鉄筋ひずみを初期値とすると、ひび割れ発生後のひずみは、鉄筋単体のひずみを上回るようになる。そこで、図-5に示す打込み直後を初期値とした載荷前の鉄筋ひずみを初期値としたところ、ひび割れ後の鉄筋ひずみが鉄筋単体としてのひずみに概ね一致することがわかった。つまり、この載荷前の鉄筋ひずみが、コン示¹⁾の曲げひび割れ幅式で規定される収縮等の影響を考慮する数値 ϵ'_{csd} ということになる。 ϵ'_{csd} は、初期ひび割れが生じていない場合には、無筋コンクリートの収縮ひずみ、クリープ係数を用いて式(2)により求めることができ、膨張材のひび割れ幅抑制効果は、この ϵ'_{csd} において評価することができるものと考えられる。

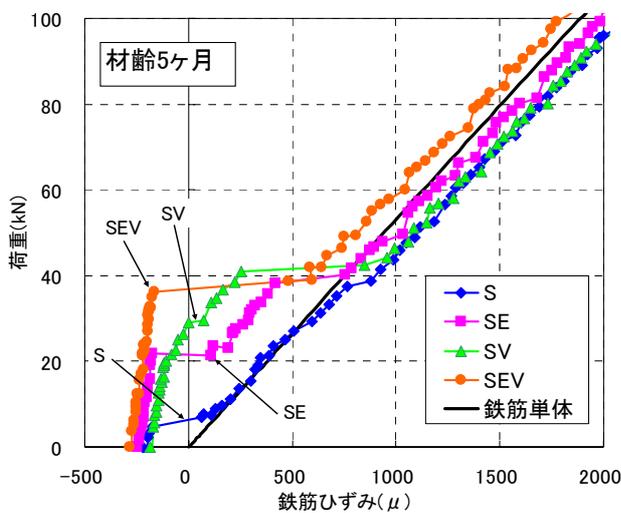
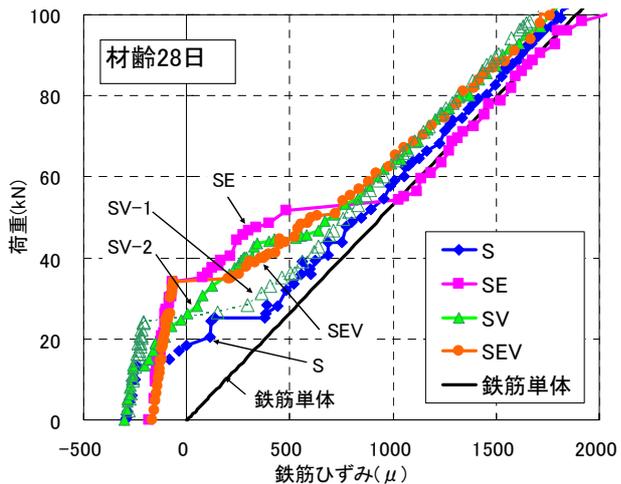


図-10 一軸引張試験時の荷重-鉄筋ひずみ関係

図-11 に、引張試験時のひび割れ発生強度を示す。横軸は実測値を、縦軸は各材齢時の割裂強度実測値から、図-8 に示す載荷直前の鉄筋拘束応力を差引いたものである。膨張材を添加した SE, SEV では、ひび割れ発生強度が無添加の 2 倍程度以上であり、本手法によりひび割れ発生強度が概ね推定できていることがわかる。

ビニロン短繊維混入の効果としては、ひび割れ発生後のテンションステフィニングに期待していたが、材齢 28 日では SV 配合の 2 体中、1 体はおおよそ期待通りであったが、1 体は未混入と全く同じ挙動を示し、ばらつきが表れている。しかし、材齢 5 ヶ月時において、ビニロン短繊維未混入の S, SE では微細な初期ひび割れの影響と考えられるひび割れ強度の低下が見られるのに対し、SV, SEV ではその兆候は見られず、ビニロン短繊維は長期材齢において微細ひび割れの

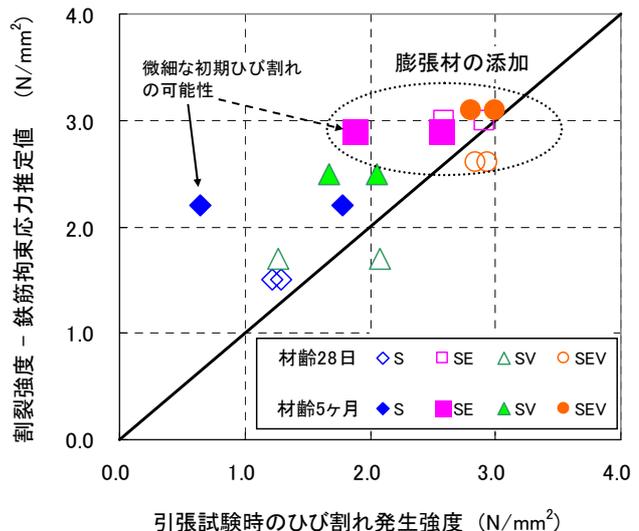


図-11 ひび割れ発生強度の実測値と推定値

影響を緩和する効果があることが認められる。

4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1)乾燥収縮の影響を受けた RC 部材のひび割れ発生強度は、式(1)および無筋コンクリートの収縮予測に基づいた式(2)により拘束応力と割裂強度の差分により推定することができる。
- (2)コンシ¹⁾の曲げひび割れ幅算定式における収縮の影響を表す数値 ε'_{csd} は式(2)に相当し、膨張材のひび割れ幅抑制効果は、この数値に含めて評価することが可能と考える。
- (3)ビニロン短繊維を 0.4%/vol 混入した場合のテンションステフィニング効果にはばらつきが認められるものの、微細ひび割れの影響を緩和する効果が期待できる。今後、より多くのデータを収集し、定量的把握を努める予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造的能照査編],2002年
- 2) 玉置一清, 三加崇, 浅井洋, 藤田学：鉄筋が乾燥収縮を拘束することによって生じる初期ひび割れに関する基礎的研究, プレストレストコンクリート技術協会 第 14 回シンポジウム, pp.123-128, 2005年11月