

[54] 非対称拘束を受けた鋼繊維補強コンクリートの乾燥収縮特性

正会員 白川 潔 (住友金属工業 中央技術研究所)
 正会員 ○小山 清一 (住友金属工業 中央技術研究所)
 正会員 寺田 博昌 (横河橋梁製作所 研究所)

1. まえがき

鋼床版上のアスファルト舗装は、鋼床版の剛性が低く、鋼板との付着が余り良くないことなどにより、路盤上の一般舗装に比べ、わだち掘れ、流動の点で、問題となることが多い。そこで、舗装材の耐久性を高める目的で、鋼繊維補強コンクリート(SFRC)を鋼床版舗装に用いた合成鋼床版を考案し、種々検討を行ってきた¹⁾。その結果、ずれ止めを介して鋼床版と一体化構造とすることにより、床版全体の面外剛性が大幅に向上することが確認された。その反面、SFRCは鋼床版に拘束されるため、乾燥収縮により大きな引張応力が発生し、ひび割れの生じる恐れがある。

このような状況から、鋼床版などで非対称拘束されたSFRCの乾燥収縮時の拘束度とひび割れとの関係をモデル実験により明らかにするとともに、膨張材を併用した効果的なひび割れ防止法について検討を行なったのでその結果につき報告する。

表1. コンクリートの配合

No	スランプ (cm)	水結合材比 $W/(C+E)$ (%)	細骨材率 S/a (%)	SF 混入率 (Vol%)	単 位 量 (Kg/m ³)						(5) 膨張材添加量 (Kg/m ³)
					水	結合材 (1)	砂 (2)	砂利 (3)	SF (4)	A/E 減水剤	
1	8±2	60	70	1.5	216	360	1110	473	118	0.9	30, 40, 50, 70,
2	"	50	"	1.5	220	440	1083	462	118	1.18	50, 70, 100
3	"	50	42	0	158	316	760	1045	0	0.79	30

2. 実験概要

2.1. 供試体の種類

実験に用いたコンクリートの配合を表1に示す。拘束試験に先立ち、膨張材添加量Eを30~100 Kg/m³の範囲で変化させ、2種類の水結合材比 $W/(C+E)$ について、膨張材がSFRCの乾燥収縮及び強度に及ぼす影響を調査した。

非対称拘束供試体は、図1に示すような形状とし、コンクリート表面ひずみ測定区間300mmにひび割れが発生するようにした。コンクリート厚さは60mm一定とし、拘束体は鋼床版のデッキプレート、縦横リブの拘束を再現できるよう3種類選定した。拘束体表面には、コンクリートを合成するため、スタッドジベルを150mmピッチに溶植し、端部にはアンカーボルトを設けてコンクリートの軸方向変位を拘束した。

供試体の種類と配合との組み合わせを表2に取りまとめ示す。拘束度 γ (コンクリートと拘束体の曲げ剛性比 $E_s I_s / E_c I_c$)を0.35~184とし、SFRCとプレコンクリート(PC)の膨張材添加量は、それぞれ50, 30 Kg/m³と、両者の膨張量がほぼ等しくなるよう配慮した。なお比較用自由乾燥収縮供試体としては、100×100×400の角柱を用いた。

- (1) 普通ポルトランドセメント+膨張材 (C)
- (2) 久慈川産, 比重2.58, 粗粒率2.8
- (3) 鹿島産, Gmax 10mm, 比重2.57, 粗粒率6.98
- (4) 0.5×0.5×30mm, 波形 (5) エトリンガイト系

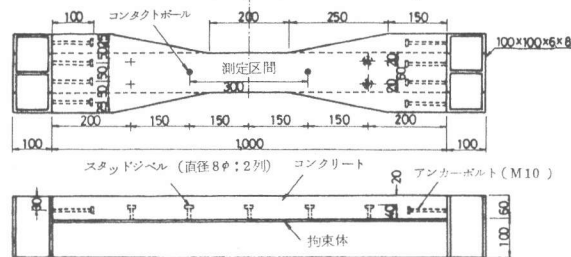


図1. 非対称拘束供試体の形状寸法(供試体Bの場合)

表2. 非対称拘束供試体の種類

記号	断 面	断 面 積 (cm ²)		断面2次モーメント (cm ⁴)		拘束度 γ $= E_s I_s / E_c I_c$	配 合	
		Ac	As	Ic	Is		SF混入率 (Vol%)	膨張材添 加量(Kg/m ³)
A		60	22	180	8.9	0.35 ($E_s I_s / E_c I_c = 7$)	1.5	50
B		0	0	60	22	180	383	1.49 (")
		0	30					
		1.5	0					
C		0	30	60	64	180	4720	184 (")
		1.5	50					

(注) 添字C, Sはそれぞれコンクリート, 拘束体(鋼製)を表す。

2.2. 実験方法

拘束供試体は、打設後材令1日でコンクリート表面にコンタクトボールを埋込み、以後材令14日まで20±2℃の室内で湿潤養生した後、湿度50～70%の室内に放置し、表面の長さ変化をコンタクトゲージにより測定した。同時に拘束体上下面にワイヤストレンゲージを貼付し、拘束体のひずみ変化を測定した。また、ひび割れ幅は拡大鏡(精度: 1/100 mm)により測定した。

自由収縮供試体の長さ変化は、測長340 mmのコンパレータにより測定した。なお、配合決定のための試験では、材令14日までの養生を水中とした。また、曲げ・圧縮試験には100×100×400ℓ, 100φ×200ℓの供試体を用い、いずれも20±2℃の水中にて28日間養生した後試験に供した。

3. 実験結果と考察

3.1. 膨張材を添加したSFRCの自由乾燥収縮

SFRCの長さ変化率と材令との関係の一例を図2に示す。膨張材を添加したSFRCの膨張は材令7日でほぼ終結し、以後の膨張は少ない。図3は、膨張及び乾燥収縮がほぼ終結する材令14日と180日におけるSFRCの長さ変化率を、膨張材比 $E/(C+E)$ で表わした結果で、これより、膨張ひずみは膨張材比が増加するにしたがって大きくなり、その値は $E/(C+E) > 11\%$ となると急激に増大することがわかる。膨張材比がさらに増加し、 $E/(C+E) \approx 23\%$ となると膨張破壊を生じた。また、SFRCではSFにより膨張が拘束されるため、同一膨張材比のPCに比べ膨張量は約30%程度減少する。なお、同一膨張材比では、水結合材比 $W/(C+E)$ の小さい方が膨張量は増加する。

3.2. 膨張材を添加したSFRCの強度

膨張材を添加したSFRCの曲げ及び圧縮強度比と膨張材比 $E/(C+E)$ との関係を図4に示す。水結合材比 $W/(C+E)$ に関係なく、圧縮強度は膨張材比が11%以上となると除々に低下し始めるが、曲げ強度は膨張材比が16%までほとんど低下しない。これは、SFにより

膨張が拘束されるため、コンクリートに圧縮のプレストレスが導入されること、及びコンクリートとの付着が改善されることなどにより、過度な膨張による内部組織の微視的破壊が抑制されるためと考えられる。

以上より、SFRC(SF=1.5vol.%)の場合、膨張材比 $E/(C+E)$ が11%程度であれば強度低下はほとんどなく、乾燥による収縮ひずみ(材令180日)を膨張材無添加の場合の1/2以下に低減できることがわかった。

3.3. 非対称拘束されたコンクリートの乾燥収縮

SF及び膨張材を添加したコンクリート表面ひずみの経時変化を図5に、同一配合で拘束度を変化させた場合の経時変化を図6に示す。ここに、表面ひずみは、標点距離 $L=300$ mmの長さ変化量を L で除した見掛け上のひ

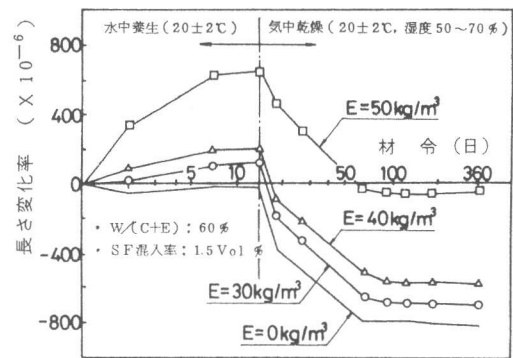


図2. 膨張材を添加したSFRCの長さ変化率の経時変化(自由収縮供試体)

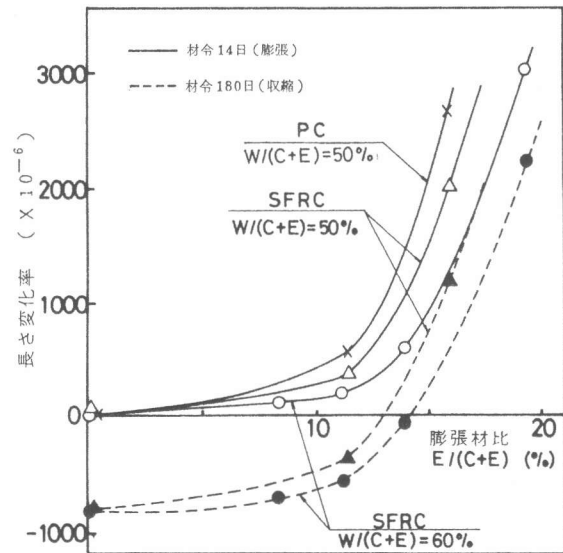


図3. SFRCの長さ変化率と膨張材比との関係(自由収縮供試体)

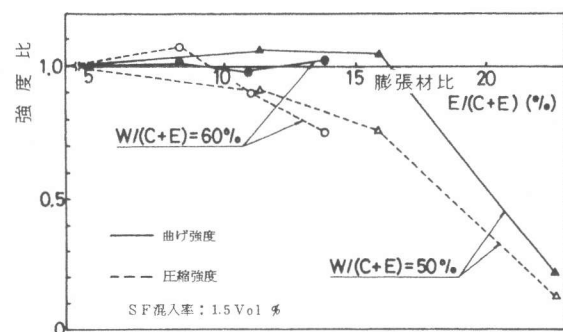


図4. 膨張材がSFRCの圧縮及び曲げ強度に及ぼす影響(自由収縮供試体)

ずみである。図中には、目視で観察されたひび割れ発生材令を併記している。コンクリート表面ひずみは湿潤時に膨張、乾燥時には収縮し、その値は拘束度 r ($E_s I_s / E_c I_c$) が大きくなるほど減少する。これは、コンクリートの自由な収縮が拘束されるためである。

その結果、コンクリート内部には引張応力が発生し、供試体 B ($r = 14.9$) の場合、膨張材無添加の PC が材令 56 日、膨張材を添加した場合で材令 84 日、また膨張材無添加の SFRC で材令 112 日に、それぞれひび割れが発生した。拘束度がさらに大きい供試体 C ($r = 184$) の場合には、膨張材を添加した PC で材令 56 日にひび割れが発生した。しかし、SFRC に膨張材を添加した場合には、材令 1 年経過後もひび割れの発生はなく、SF の優れたひび割れ防止効果が認められた。なお、ひび割れのない供試体のコンクリート表面ひずみが、材令 100 日以上経過すると、見掛け上収縮から膨張へと移行するのは、コンクリートのクリープにより収縮応力が緩和され、クリープひずみが付加されるためと考えられる。

また、ひび割れ発生供試体のひび割れ幅進展状況は図 7 に示すとおりで、SF 混入により、ひび割れ幅の進展は PC の 1/2 以下に抑制されることがわかる。

3.4. コンクリートに生じる乾燥収縮応力の推定

コンクリートの収縮が鋼床版などで非対称に拘束される場合、今回の実験のように非常に厳しい乾燥条件下では、ひび割れが生じる。しかしながら、コンクリートに生じる収縮応力は膨張材の混入により低減されるとともに、クリープにより緩和される。このことを考慮して、ここでは、コンクリートの乾燥収縮応力を、Rüsh らの提案による段階的積分法を用いて推定した。

Rüsh らによれば、コンクリートにある時間々隔 $\Delta t_i = t_i - t_{i-1}$ に一定応力 σ_{ci} が持続荷重されたときの、時間 t_n におけるクリープ係数 $\varphi_{n,i}$ は遅れ弾性変形及び流動変形を考慮した次式で表わされる。

$$\varphi_{n,i} = \varphi_{v0} \cdot K_v(t_i - t_{i-1}) + \varphi_{f0}(K_f t_i - K_f t_{i-1}) - \varphi_{v0} \cdot K_v(t_n - t_i) \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 $\varphi_{v0} = 0.4$ (遅れ弾性変形の最終値)、 $K_v =$ (遅れ弾性変形の時間変化を考慮した係数)
 $\varphi_{f0} = 3.0$ (流動の基本値)、 $K_f =$ (流動変形の係数)

いま、コンクリートに図 8 に示すような圧縮 (膨張時) 及び引張 (収縮時) の拘束応力が生じるとすると、一定応力 $\sigma_{ci} = (\sigma_{i-1} + \sigma_i) / 2$ が作用したときの時間 t_n におけるクリープひずみ ϵ_{k,t_n} は次式で求められる。

$$\epsilon_{k,t_n} = \sum_{i=1}^n \varphi_{n,i} \cdot \sigma_{ci} / E_c \quad \dots\dots (2)$$

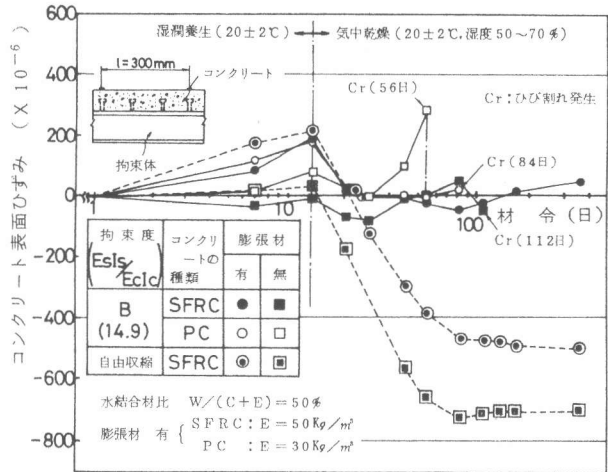


図 5. 拘束を受けたコンクリート表面ひずみの経時変化 (膨張材の影響)

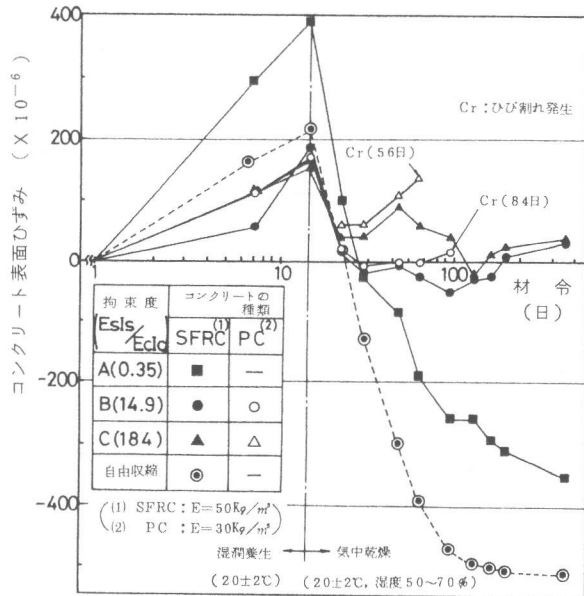


図 6. 拘束を受けたコンクリート表面ひずみの経時変化 (拘束度の影響)

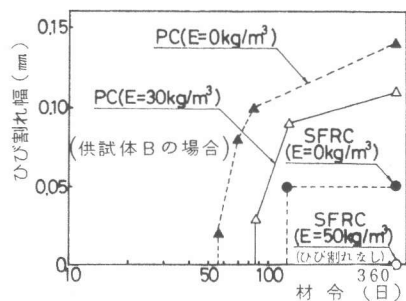


図 7. ひび割れ幅の経時変化

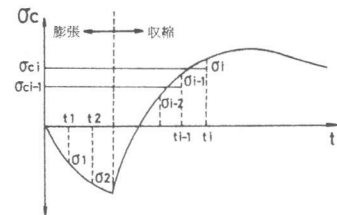


図 8. コンクリートの拘束応力

拘束体とコンクリートが完全に合成されているとすれば、拘束体とコンクリートのひずみ及び応力は図9のごとくなり、ひずみの適合条件より、(3)式が成立する。

$$\epsilon_{tn} + \epsilon_{k, tn} + \sigma_{cl, n} / E_c = \sigma_{su, n} / E_s \dots (3)$$

各部応力は、コンクリートの自由膨張または収縮ひずみ ϵ_{tn} が与えられれば、従来の弾性式を用いて求められる。ここでは、拘束応力 $\sigma_i = (\sigma_{cu, i} + \sigma_{cl, i}) / 2$ とし、 ϵ_{tn} に実測値を用いて計算した。

以上の計算により求められた拘束供試体断面のひずみ分布及び拘束体下面ひずみの経時変化を、それぞれ実測値とともに図10, 11に示す。計算値は実測値と比較的良好一致しており、経時変化の傾向も良く表わしている。計算値が実測値より大きくなっているのは、コンクリートの弾性係数 E_c を $3 \times 10^5 \text{ Kg/cm}^2$ 一定と仮定していること、膨張収縮ひずみ ϵ_{tn} が、実際には両面乾燥状態の場合より小さい、などの理由によるものと考えられる。

図12は、本計算により求められたコンクリート下面の曲げ応力 σ_{cl} と、拘束試験で得られたひび割れ発生材令との関係を示したもので、これより σ_{cl} は供試体B, Cとも、膨張材添加の有無にかかわらず、材令30~60日以上になるとPCの曲げ強度を上回り、ひび割れが発生することがわかる。さらに、膨張材無添加の場合には、材令70日でSFRCのひび割れ発生応力を上回り、いずれも拘束試験時のひび割れ発生と良い一致を示している。なお、コンクリートに生じる曲げ応力は、膨張材無添加の場合材令60~70日で、膨張材添加の場合材令80~90日で最大値を示し、以後、クリーブにより応力は緩和されるため、膨張材添加SFRCにはそれ以後ひび割れ発生はないと言える。

本計算をもとに、拘束度とコンクリートの最大曲げ応力との関係を求めたのが図13で、これより、本実験で用いた供試体Cよりさらに拘束度が大きくなっても、最大応力はあまり増加しないことがわかる。

4. まとめ

(1) SFRC (SF = 1.5 Vol %) の場合、膨張材比 $E/(C+E)$ が11%程度であれば、曲げ、圧縮強度の低下はほとんどなく、乾燥による収縮ひずみを膨張材無添加の場合の1/2以下に低減できる。

(2) 水結合材比 $W/(C+E) = 50\%$ で、かつSFRCに膨張材を 50 Kg/m^3 添加することにより、拘束度 $E_s I_s / E_c I_c \approx 180$ 程度の非対称拘束があっても、乾燥収縮ひび割れを防止できる。

○参考文献 1) 寺田, 小山, 松本, 有原, "SFRC合成鋼床版の開発," 第3回コンクリート工学年次大会

2) H. Rüsch, D. Jungwirth, "コンクリート構造物のクリープと乾燥収縮," 百島祐信訳, 鹿島出版会

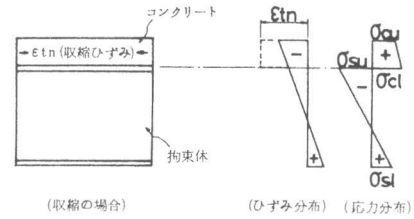


図9. 拘束供試体の各部応力及びひずみ

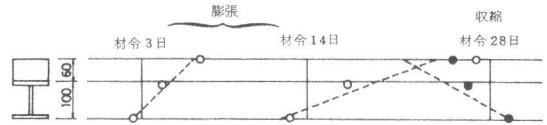


図10. 拘束供試体断面のひずみ分布(供試体Bの場合)

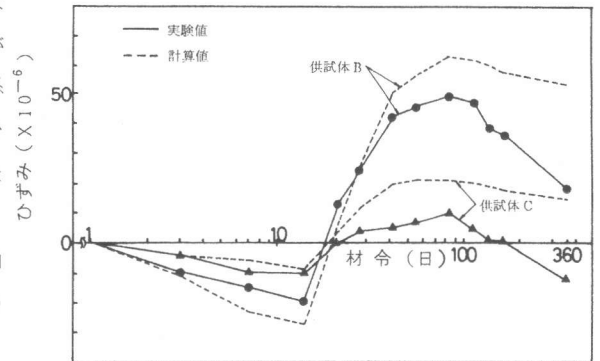


図11. 拘束体下面ひずみの経時変化(膨張材添加SFRCの場合)

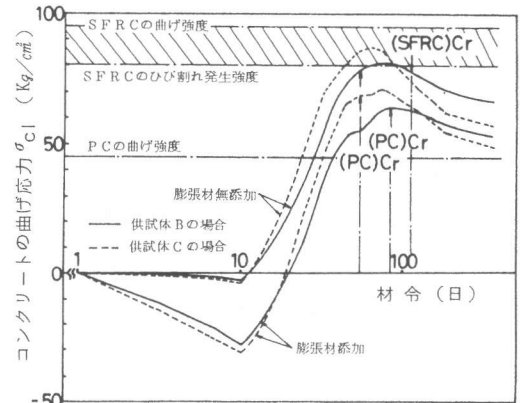


図12. 非対称拘束されたコンクリートの曲げ応力 σ_{cl} の経時変化(計算値)

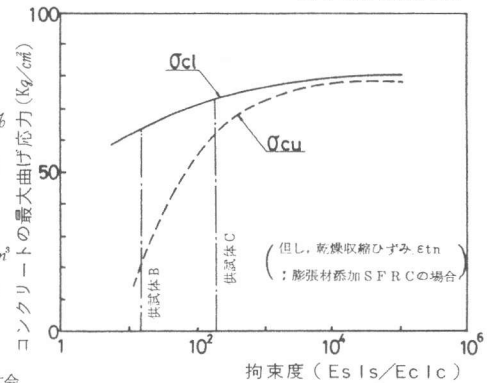


図13. 拘束度とコンクリートの最大曲げ応力との関係