

(7) S F R C 合成鋼床版の研究

明石重雄[※]

寺田博昌^{※○}

松本好生[※]

小山清一^{※※}

1. まえがき

通常、鋼床版上には、アスファルト系の舗装が施工される。アスファルトは舗装材として比較的廉価であり、施工性にもすぐれていて、一般道路におけるように均一な路盤・路床上に施工される場合は特に問題ない。しかし、鋼床版の場合は、撓み剛性が小さいこと、鋼板とアスファルトの附着に問題があること、縦、横リブの存在によりデッキプレートの変形が均一でないことなどのため、舗装にひび割れ、縦流れ、わだち掘れおよび剝離といった問題が生じることが多い。さらに寒冷地においては、冬期にスパイクタイヤやタイヤチェーンによる摩耗も大きな問題である。

こういったアスファルト系舗装の問題を解決するものとして、鋼繊維補強コンクリートを舗装材として用いることを考えた。鋼繊維補強コンクリート（以下 S F R C と略す）とは、断面積が $0.06 \sim 1 \text{ mm}^2$ 、長さが $15 \sim 60 \text{ mm}$ の鋼繊維を容積率で $0.5 \sim 2 \%$ コンクリート中に混入することにより、コンクリートの欠点であるもろさを改善し、曲げ、引張、衝撃、疲労などの各種性能を向上させた新しい複合材料である。さらに S F R C はアスファルトのような温度依存性がないため、流動は生ぜず、耐摩耗性、ひび割れ抵抗性にも優れている。このような特質を有する S F R C を鋼床版とずれ止めにより合成し、舗装材および鋼床版断面の一部として利用しようとするのが本構造である。ただし、S F R C の乾燥収縮が鋼床版により拘束されるため、S F R C には大きな内部応力が発生し、これに輪荷重や、走行車輛による繰返し応力が作用すると、ひび割れの生じる恐れがある。そこで、乾燥収縮ひび割れに対する検討、合成挙動の確認および実大規模の S F R C 合成鋼床版橋を用いた繰返し載荷試験による耐久性の確認を行なった。その結果の一部を報告する。

2. S F R C の乾燥収縮ひび割れに対する検討

2-1 S F R C の配合と供試体

実験に用いた S F R C の配合を表-1 に示す。鋼繊維（以下 S F と略す）の形状寸法は、 $0.5 \times 0.5 \times 30 \text{ mm}$ で、長さ方向にはコンクリートとの附着力を高めるため波形加工が施されている。S F 混入率は S F R C の曲げ強度、施工性および経済性を考慮して $1.5 \text{ Vol} \%$ 一定とした。配合決定に際し、スランブはポンプ打設を前提に $8 \pm 2 \text{ cm}$ とし、水セメント比に相当する水結合材比 $W/(C+E)$ (W : 水量 C : セメント量, E : 膨張材量) を $50, 60 \%$ の 2 種類選定した。また、S F R C の厚さは 60 mm とし、粗骨材最大寸法は部材厚の $1/4$

以下となるよう 10 mm とした。

乾燥収縮防止対策として膨張材の添加を考え、混入量を $30 \sim 100 \text{ g/m}^3$

で変化させ、その効果を確認した。

※ 御横河橋梁製作所, ※※ 住友金属工業㈱

表-1 コンクリートの配合

No.	スランブ (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)					(6) 膨張材添加量 (kg/m ³)	
					水	(1) 結合材	(2) 砂	(3) 砂利	(4) S F		A E(5)
1	8±2	60	70	1.5	216	360	1110	473	118	0.99	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

(1)普通ポルトランドセメント(C)+膨張材(E)
(2)久慈川産,比重2.58,粗粒率2.8

(3)鹿島産,Gmax10 mm,比重2.57,粗粒率6.98
(4)0.5×0.5×30 mm,波形
(5)ボゾリスNo5L
(6)デンカCSA#20

供試体は、実構造を想定してS F R Cが下面のみ

拘束される非対称拘束供試体とし、拘束断面を変えた3ケースとした。また比較用に対称拘束供試体および自由乾燥収縮供試体も試験に供した。供試体の種類を表-2に、形状寸法の例を図-1に示す。

2-2 実験結果

(1) 乾燥収縮特性と強度特性

無拘束S F R Cの膨張材混入量を種々変化させた場合のS F R Cの長さ変化率と材料の関係を図-2に示す。S F R Cの膨張は膨張材混入量にほぼ比例して増大するが、材令7日でほぼ終結し、それ以後の膨張量はわずかである。材令14日以後の乾燥状態における収縮ひずみは、混入量に関係なくほぼ一定である。したがって、膨張材の効果は、水中あるいは湿潤養生下すなわち乾燥状態に移行する以前にどれだけ収縮に対し補償を行なえるかによることが明らかである。

次に、膨張材混入S F R Cの曲げおよび圧縮強度比を図-3に示す。図より明かなように圧縮強度は膨張材比 $E/(C+E)$ が11%を越えると低下しはじめ $E/(C+E)=15\%$ では無混入の場合の強度の0.8になる。また $E/(C+E)=23\%$ では膨張破壊を生じて0.1まで低下した。他方、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、S Fにより、膨張が拘束されて、コンクリートには圧縮のプレストレスが導入されること、コンクリートとの附着が改善されることなどにより、膨張による内部組織の微視的破壊が抑制されたためと考えられる。

以上の結果から、強度低下がほとんどなく、乾燥収縮ひずみを低減しうる最大膨張材比は11%と判断され、乾燥収縮ひずみは無混入の場合の1/2となる。

(2) 拘束S F R Cの乾燥収縮特性

図-4に同一取合で拘束度を変化させた場合の、

表-2 拘束供試体の種類

試 体 種 別	断 面	断面寸法(mm)		断面2次モーメント (cm^4)	拘束度 α $\alpha = E_s A_s / E_c A_c$	配 合			
		A_c	A_s			SF混入率 (vol%)	膨張材比 加量(kg/m^3)		
非	A		60	22	180	8.9	0.35 ($E_s A_s / E_c A_c = 7$)	1.5	50
	B		60	22	180	383	14.9 (*)	0 0 1.5 1.5	0 30 0 50
非	C		60	64	180	4720	184 (*)	0 1.5	30 50
	D		60	44	—	—	(5.70)	0 1.5	30 50
自由端 固定体	E		100	—	—	—	0	0 0 1.5 1.5	0 30 0 50

(*) E: 弾性係数

添字c,sはそれぞれコンクリート、膨張材(鋼製)を表わす。

●: 1内の鋼は $E_s A_s$ 、 $E_c A_c$ として計算。

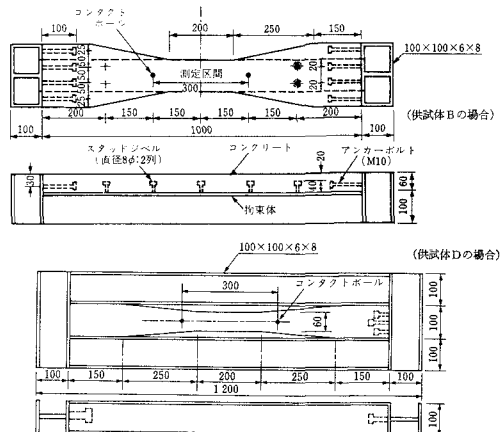


図-1 供試体形状・寸法の例

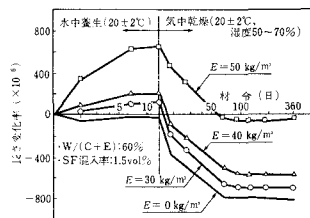
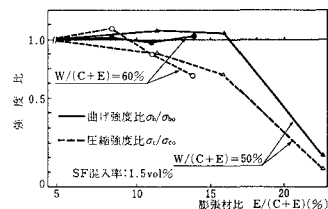


図-2 SFRCの長さ変化率(供試体E)



ただし、 $E/(C+E)=$ 0%のとき	$W/(C+E)=50\%$	$W/(C+E)=60\%$
	σ_b 80.7 kgf/cm^2 σ_c 416 kgf/cm^2	75.9 kgf/cm^2 342 kgf/cm^2

図-3 SFRCの強度比

コンクリート表面ひずみの経時変化を、また図-5には供試体Bと無拘束の供試体について、SFおよび膨張材の影響を示す。図中のPCはSF無混入のプレーンコンクリートである。また目視で観察されたひび割れをCr(材令)で示している。

両図から判るように、拘束を受けたコンクリート表面ひずみは、無拘束供試体と同様に湿潤時に膨張、乾燥時に収縮性状を示すが、その程度は拘束度 γ が大になるほど減少しており、コンクリートの自由な膨張、収縮が拘束されることを示している。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の膨張材無混入のPCは、材令56日で、膨張材混入PCと膨張材無混入のSFRCは材令112日にそれぞれひび割れが発生した(図-5)。さらに拘束度を大きくした供試体Cでは、膨張材混入PCが材令56日にひび割れが発生した(図-4)。しかし、膨張材を混入したSFRCでは材令1年後もひび割れの発生はなく、SF、膨張材混入のひび割れ防止効果が認められる。

両面に対称に拘束された供試体Dでは、拘束鋼断面が供試体Cより少ないにもかかわらず、膨張材を混入したPC、SFRCとも材令21日、49日と短期間でそれぞれひび割れが発生しており、拘束条件によつては、収縮ひび割れの防止が困難になることが判る。

図-6は、ひび割れ発生以後の材令とひび割れ幅の大きさを示したもので、これよりSFはひび割れの発生を遅らせると同時に、それ以後のひび割れ幅の拡大を抑制することが分る。

3. 合成挙動確認試験

3-1 試験体と試験方法

鋼床版とSFRCの合成挙動を確認するため、縦横リブ付きの試験体を用いて、静的載荷試験を行なった。試験体の一般図を図-7に示す。構造は縦リブを主桁、横リブ位置を支点とする系をとり出した

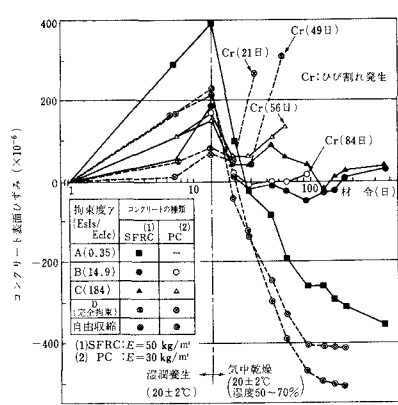


図-4 ひずみの経時変化(拘束度の影響)

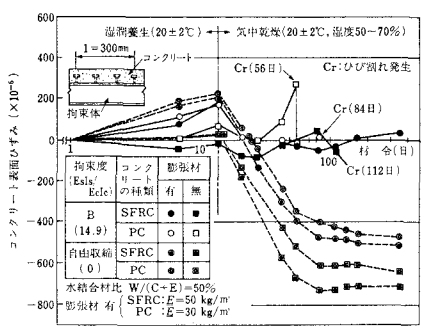


図-5 ひずみの経時変化(SF, 膨張材の影響)

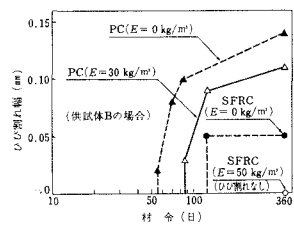


図-6 ひび割れ幅の経時変化

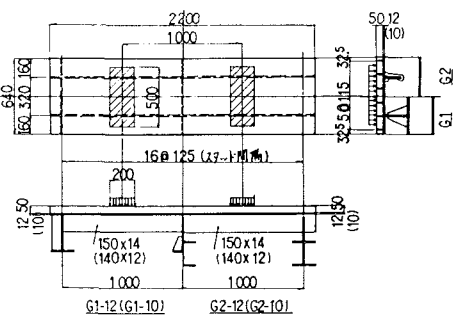


図-7 合成挙動確認試験体

2 径間連続桁である。

試験体 G 1 は通常の鋼床版構造で、そのうち試験体 G 1-12 はデッキプレート厚が 12 mm, 縦リブ断面が 150×14 のもの, G 1-10 はデッキプレート厚を 10 mm, 縦リブ断面を 140×12 と減少させたものである。また, 試験体 G 2 は, 横リブの構造を変え, 縦リブのみを横リブで支持する構造としたものである。これは, 将来鋼床版をパネル化し製作の簡略化を計ることを考えたことと, 荷重伝達機構を明確にすることを意図したものである。G 2-12 と G 2-10 の違いは試験体 G 1 と同じく, 鋼断面を変えたもので, S F R C との合成作用により鋼断面低減の可能性を明らかにすることを目的としている。コンクリートは S F R C で, 厚さは供用後の摩耗による減厚を考え 5 cm とした。またずれ止めには, 8 φ×40 のスタッドを用いた。

荷重は, 両径間中央部に 200×500 の分布荷重とし, 等分布荷重になるよう砂箱を介した。

なお, S F R C を打設しない試験体 (G 0) も比較のため試験に供している。

3-2 試験結果

図-8 に, 漸増繰返し荷重載荷時の中間横リブ上 S F R C 表面のひずみ線図を, 図-9 には, 中間支点近傍の断面のひずみ分布を示す。また, 載荷点直下位置における縦リブ間のデッキプレートのたわみ線図を図-10 に示す。

これらの図から以下の諸点が明らかになった。

- ① 試験体 G 1 と G 2 では, 横リブ構造の違いによつて, 支点部のひずみ挙動も異なり, G 1 構造の方が S F R C の引張ひずみが大きい。これは, デッキプレートと S F R C との合成作用により版剛性が大幅に向上したために, リブ間の板作用応力が支点部に影響を及ぼしたと考えられる。
- ② 試験体 G 1-10, G 2-10 はそれぞれ荷重 7 ton, 15 ton でクラックの発生が見られ, G 2-12 では 9 ton でクラックが発生した。

それまでは, ほぼ直線的なひずみ挙動を示す。ひずみ分布図からも, S F R C と鋼断面とは合成断面として応力分担していることが判る。以上のことから, 合成部材として設計しうると同

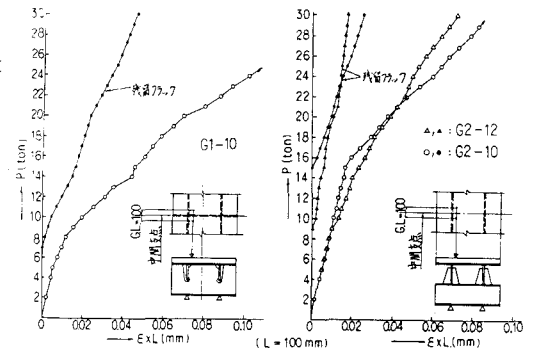


図-8 S F R C 表面荷重-ひずみ線

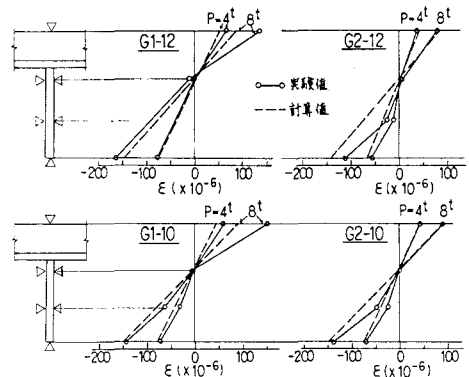


図-9 中間支点近傍断面ひずみ分布

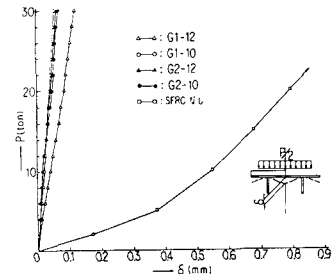


図-10 リブ間版のたわみ線図

時に、鋼断面の大きさが S F R C のクラック発生に与える程度は余り顕著ではないと言える。

- ③ クラック幅は荷重の増大とともに大きくなるが、その程度は小さく、設計荷重 8 ton の約 4 倍の 30 ton 載荷後においても 0.05 mm (G 1-10) であつた。
- ④ リブ間版の曲げ剛性は、S F R C の存在により著しく向上し、たわみは約 1/30 にまで減少する。

4. S F R C のクラック進展確認試験

4-1 供試体と試験方法

合成された S F R C の曲げ引張あるいは何らかの施工上の不都合などによつてクラックが発生した場合のクラックの進展性状を知るため、モデル化した合成梁を用いて疲労試験を行なつた。図-11 に供試体形状と載荷方法を示す。この試験においては、ずれ止めとしてスタッド (8φ×40) と折曲げ鉄筋 (6φ) の 2 種類を用いた。折曲げ鉄筋は、ずれ止めとしての機能と引張応力分担によるクラック幅拡大防止の機能を期待したものである。

試験方法としては、供試体中央に集中荷重を静的に作用させ、S F R C に表面クラックを発生させた後、繰返し荷重を与えて、クラック幅の進展を調べた。

4-2 試験結果

試験結果の一部を図-12, 13 に示す。図-12 は静的載荷により供試体中央の S F R C 表面に約

0.014 mm のクラックを生じさせた (静的最大荷重 3.7 ton) 供試体の疲労試験結果で、第一段階として 3.7 ton ~ 1.7 ton の荷重振幅で一定回数繰返し載荷し、その後上限荷重を 4.2 ton, 4.7 ton と増加させたものである。また図-13 には 200 万回の繰返し載荷終了後、静的に 20 ton まで、サイクリックに載荷し、載荷時のクラック開口幅と除荷時の残留クラック幅をプロットしている。

これらの図より、ずれ止めとしてスタッドを用いた場合も折曲げ鉄筋を用いた場合も、クラック幅の進展挙動に特に有意差は見られない。またクラック幅の増大は僅かであつて、200 万回繰返し載荷後のクラック幅は約 0.04 mm で初期値 0.014 mm の約 3 倍程度である。これは、S F R C 表面に微少クラックが生じて、コンクリート中の鋼繊維の引き抜き抵抗があつて、クラックの進展を防止するとともに、ずれ止めが S F R C と鋼断面とのずれ変形を拘束するためと考えられる。したがつて、繰返し荷重の増大があつても、微少クラックが S F R C 全体の破断に結びつく事はないと言える。さらに、引張鉄筋を入れても、載荷時、除荷時のクラック幅は、スタッドの場合と変わらず、鋼繊維と鉄筋の重ね合せ効果は得られなかつた。

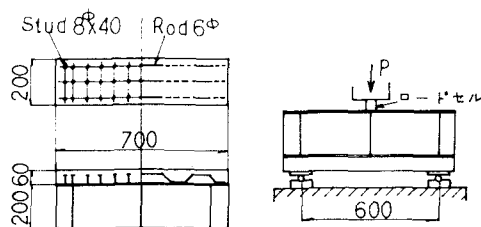


図-11 供試体と載荷方法

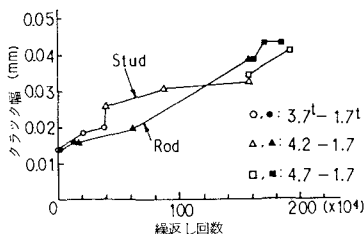


図-11 繰返し数とクラック幅

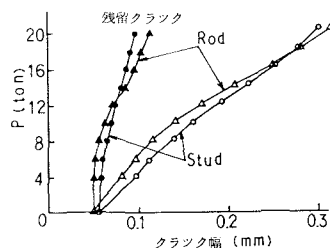


図-13 荷重-クラック線

5. 実大SFR C合成鋼床版橋での耐久性試験

5-1 試験概要

SFR C合成鋼床版の施工性、構造特性および耐久性を実際に近い条件下で調査することを目的に実橋を想定した試験橋を用いて繰返し載荷試験を行なった。図-14に試験橋の一般図を示す。試験橋は、支間長8 m、幅員5.8 mの3主桁で、

横リブ間隔は2 m、縦リブのトラフリブ中心間隔は600 mmである。部分モデルでの合成挙動確認試験の結果、デッキプレートの薄肉化、リブ断面の縮小も可能と考えられたが、リブ溶接によるひずみの発生とそれに伴うひずみ測定への影響を考へて、デッキプレート厚は道示の規定最少厚12 mm、縦リブは6 mmとした。

コンクリート舗装厚は、現場継手を設けたことにより、60 mmと72 mm厚である。

SFR Cの配合は表-1における水結合

材比50%のものと同一である。試験橋の一部には比較用にブレンコンクリートを打設している。ずれ止めとしては、スタッドを用い、その間隔は、主桁とコンクリートとの水平せん断力で計算される値とした。

繰返し載荷試験には、前輪荷重2.5 ton、後輪荷重5 tonの荷重車を使用し、中心半径12 mの円形走行路を時速20 Km/hで走行させた。また繰返し載荷の途中段階において、輪荷重を8 ton、12 tonと増大させて、静的な載荷試験を行ない、各部ひずみの変状、クラック発生の有無を調べた。

試験は約1年間実施され、総走行回数は50万回に達した。

表-3に試験手順と内容を示す。

5-2 試験結果

(1) コンクリートの打設

打設量2.4 m³のSFR Cは、生コンプラントで混練し、トラックミキサーで現地まで運搬してシュートで荷卸し打設した。鋼繊維の混入は、20 kg入りの整列梱包箱から直接人力によりプラントに投入する方法をとった。そのため鋼繊維の不均一な分散、ファイバーボール（鋼繊維のかたまり）の発生が心配されたが、打設時に注意深く観察した所、特に異常は認められなかった。打設後表面にブリージング水が湧出する約3時間後に、沈下ひびわれを防止するための再コテ仕上げを行なった。打設に要した時間は、3.6 m³で約1.5時間であり、仕上げには1時間×2回を要した。

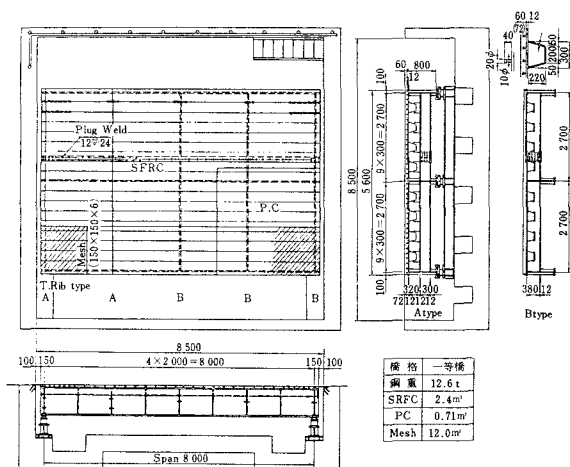


図-14 試験橋一般図

表-3 試験内容と手順

	試験内容	備考
1	静的載荷試験	コンクリート打設前
	スタッド溶接, コンクリートの打設, 養生	
2	静的載荷試験	輪荷重 5 ton
3	20万回 走行試験	*
4	静的載荷試験	輪荷重 8 ton
5	20万回 走行試験	輪荷重 5 ton
6	静的載荷試験	総重量 29 tonトラック
7	走行試験	輪荷重 5 ton

(2) 横リブのひずみ

図-15に横リブタイプ2種類について、ひずみ分布図を示す。タイプAの横リブは、計算値よりも小さい実測ひずみが得られているが、これは、荷重が間接的であるのと、計算断面に算入されていないデッキプレートも一部応力分担しているためである。

タイプBの通常の横リブは、ほぼ合成断面としての挙動を示している。また、後輪荷重 $Pr=5\text{ ton}$ と 8 ton の測定の間には20万回の繰返し載荷があるが、ひずみの増大は荷重の増大分と一致しており、この間におけるSFRCの変状はないことが判る。

(3) 縦リブのひずみ

図-16に縦リブ主要点のひずみ分布を示す。

着目点①は最大曲げモーメント作用点、②は一般部の縦リブ支点であり、通常負の曲げモーメントが作用する。着目点③は主桁に隣接する縦リブ支点位置で最少曲げモーメントの作用点である。図より正の曲げモーメント作用点では計算値とよく合ったひずみ分布を示すが、負の曲げモーメント作用点では、実測値は反転し正曲げに移行している。これは、版および縦リブの曲げ剛性が合成作用によつて向上し、格子分配性能が大幅に改善されたためと考えられ、引張に対しあまり高い強度を有しないコンクリートにとっては望ましい構造改善と言える。

(4) 版のひずみ

図-17に版の幅員方向ひずみ分布を示す。版のひずみはコンクリートの有無により大幅に変化し、鋼断面単独時のリブ上における局部引張ひずみはなくなる。これは縦リブで述べたと同様にコンクリートの合成作用により、版剛性が著しく向上したために相対的に板格子構造から板構造へ移行したものと考える。したがって、コンクリートを用いる場合、鋼床版の構造改善作用があるため、コンクリートの引張ひずみを余り重要視する必要がないと言える。

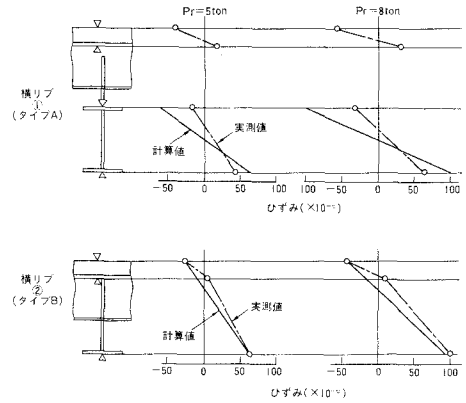


図-15 横リブのひずみ分布

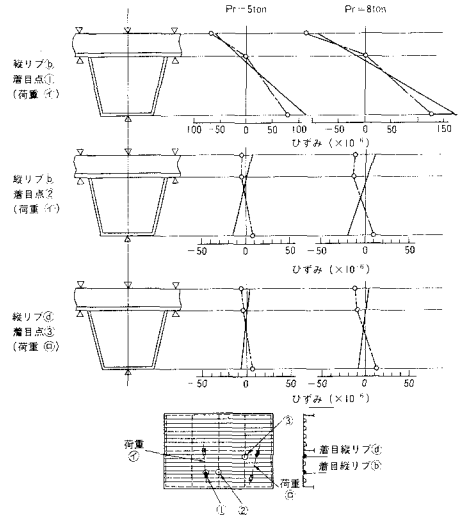


図-16 縦リブのひずみ分布

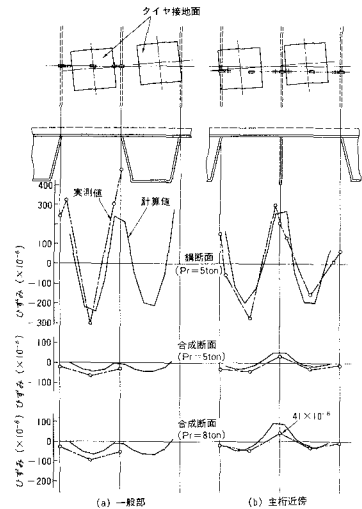


図-17 版のひずみ分布

(5) 耐久性

表一3に示すように、途中段階において、後輪軸重1.6tonおよび2.2.4tonの荷重載荷をはさんで、約1年間で50万回の走行繰返し載荷を行なった。コンクリート表面においては、応力測定とは別に、定期的に目視による変状発生の有無の観察を行なった。比較用に打設したブレンコンクリートには、コンクリート打設後3ヶ月の走行回数20万回終了時点において、中央主桁直上の表面に、主桁方向のひび割れが発生し、走行回数とともに進行した。しかし、クラックがS F R Cとの境界に達した後は、S F R C内への進行は見られなかった。1年間の走行載荷後、荷重車の走行位置を変化させ、さらに1年間繰返し載荷を行なったが、S F R C表面には、クラックの発生は生じていない。

また、普通のタイヤを使用したこともあつて、S F R C表面の摩耗量は 1mm 以下であり、鋼繊維の舗装表面への突出しは一切見られなかった。したがって、S F R Cは鋼床版の舗装材として十分な耐久性、有効性を有していると推論される。

6. 結語

新しい鋼床版舗装材として鋼繊維補強コンクリート(S F R C)をとり上げ、S F R Cを鋼床版とずれ止めにより一体化した合成鋼床版について、乾燥収縮ひび割れの検討、合成挙動の確認、疲労試験および実大規模の試験橋を用いた繰返し試験を行なった。

結果を要約すると以下のとおりである。

- 1) 膨張材を 50kg/m^3 混入すると、S F R Cの強度低下はなく、乾燥収縮ひずみを膨張材無混入の $1/2$ 程度まで低減できる。
- 2) しかも、鋼床版横桁程度の片面拘束があつても、乾燥収縮によるひび割れは発生しない。
- 3) S F R Cと鋼床版との合成は適切なずれ止めを設けることにより確保される。合成作用によりデッキプレート部分の剛性は30倍程度向上する。
- 4) S F R Cの合成効果により、鋼床版断面の低減も可能である。
- 5) クラックが発生したとしても、繰返し応力によるクラックの進展は少なく、鋼繊維の効果は高い。
- 6) 実橋に近い条件下での50万回以上の走行載荷後もS F R C表面にクラックの発生はない。また、摩耗は少なく、鋼繊維の表面への突出もない。
- 7) 鋼床版構成各部材共、S F R Cとの合成により曲げ剛性が增大するが、その程度は鋼断面の小さい部材ほど大きい。そのために部材間の相対剛比の変化があつて荷重分配は大幅に改善される。

参考文献

- 1) 寺田 ほか：S F R C合成鋼床版の実験的研究 土木学会年次講演会概要集 第35, 36回
- 2) 小山 ほか：S F R C合成鋼床版の研究 コンクリート工学年次講演会 第3, 4回
- 3) 寺田 ほか：S F R C合成鋼床版の実験 横河橋梁技報 11 (1981)
- 4) 久光 ほか：鋼繊維補強コンクリート合成鋼床版 住友金属 Vol. 35 No. 3

Application of Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC)
to Pavement on Orthotropic Steel Deck

Shigeo AKASHI
Hiromasa TERADA
Yoshio MATSUMOTO
Seiichi KOYAMA

Composite steel deck with SFRC were developed, aiming to improve the durability of deck pavement and to increase the rigidity of deck plate, in place of steel deck with bituminous concrete.

Concrete is stable in temperature change compared with bituminous concrete usually used. Moreover, the introduction of fibres into the concrete matrix imparts to the concrete certain characteristics, such as resistance to spalling and the ability to sustain load and keep cracks tightly closed after cracking, which improve the performance of fibre concrete when compared with plain or conventionally reinforced concrete. Thus, a reduction in required thickness can be realized by using SFRC and give the efficiency to reduce the dead weight on bridge.

Control methods of the cracks caused by settlement or drying shrinkage were investigated. The durability of SFRC were clarified through the static loading and cyclic loading test by use of model specimens in the laboratory and a full scale test bridge in field, prior to a practical application.

The test results are as follows.

1. Steel fibres with the expansion agency can prevent the crack initiation of SFRC, even when SFRC is restrained unsymmetrically by the steel deck with shear connectors.
2. The improvement of the deflection performance and of the load distribution can create superior durability of SFRC as a result of composite effect.