

SRC床版床組構造の鋼鉄道下路トラス橋への適用に関する実験的研究

矢島秀治¹・市川篤司²・村田清満³・北園茂喜⁴

¹正会員 ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) (〒532-0011 大阪市淀川区西中島5-4-20)

²正会員 工博 財団法人 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

³正会員 工博 財団法人 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

⁴正会員 工修 西日本旅客鉄道(株) (〒530-8341 大阪市北区芝田2-4-24)

道路や河川を跨ぐ鉄道橋は、レールレベル～桁最下端の寸法が制限されることが多い。このような制限を受ける橋梁に適用するために、筆者らは、下路形式の鋼トラス橋の床組にSRC構造を利用することを提案した。本形式の床組構造は、床版が橋軸方向に引張力を受け、主構の床版に対する拘束の影響が大きい等、力学的挙動に不明確な点がある。特に、コンクリートのひび割れに留意する必要がある。このようなことから、本研究は主構作用を受けるSRC床版床組構造の挙動を明確にすることを目的に、大型模型供試体を用いた載荷実験および乾燥収縮実験を行った。その結果、ひび割れ発生位置と進展順序、下弦材、鉄筋、コンクリートの軸力分担力等が明らかになった。

Key Words : Steel-Reinforced-Concrete (SRC) slab, railway through-truss bridge, crack, Steel fiber reinforced concrete, drying shrinkage

1. はじめに

最近、鉄道では、サービスの向上を目指し、車両の高速化の動きが活発である。縦断線形の緩勾配化は、列車の高速運転に有効な手段の1つであり、鉄道線路の建設に際しては、交差する河川条件や道路条件を満足した上で、いかに線路勾配を緩やかに設定するかが重要となっている。特に、河川改修等に伴う既設橋梁の取り替え時には、支間の長い橋梁に架け替えられることもあって、レールレベル(R.L.)～桁最下端寸法が大きな制約を受けることが多く、従来から下路形式の橋梁が採用されてきた。その場合の床組の形式として、レールをまくら木を介して、あるいは直接縦桁の上に載せた開床式床組構造(以下、開床式)が採用されることが多かったが、騒音対策の必要性から、パラスト軌道、スラブ軌道等に対応した閉床式床組構造(以下、閉床式)が用いられるようになった。従来の閉床式の床組構造は、鋼床版構造(以下、鋼床版形式)が主流であったが、最近低騒音化が可能になる¹⁾とともに維持管理上有利なコンクリート床版構造(以下、コンクリート床版形式)が採用されるようになってきた。

コンクリート床版形式の下路トラス橋は、1972年に最初に建設されたが、これらのコンクリート床版は、主構と床組を非合成構造として解析し、施工目

地を適切に配置することにより、コンクリートの有害なひび割れに対処できる²⁾としていた。しかし、実際には主構と床版とは合成作用が生じると考えられ、その点を考慮したコンクリート床版のひび割れ安全性について、適切な評価法が示されていなかった。

トラス主構とコンクリート床版を合成構造と考え、下弦材の一部として引張りにも抵抗できる構造とする考え方は、中野らが検討している³⁾。中野らの検討した合成トラス橋は、床版に作用する引張力を考慮して相当量のプレストレスを導入している。合成トラス橋とした場合、鋼材重量は非合成トラス橋に比べ約15%低減できるが、コンクリート床版厚を約20%増厚することが必要であり、これに伴う床組鋼材の重量増およびプレストレスを導入することを考慮すれば、合成構造にするとかえって不利であると指摘している。ただし、本検討ではコンクリートに引張力が生じないようにプレストレスを導入し、コンクリートにひび割れが発生することを許容していなかった。すなわち、コンクリートのひび割れを制御するといった考え方はなされていなかった。

本研究は、下路トラス橋を対象に、床組の高さを更に減らすことを可能にするSRC床版を用いた新しいタイプの床組構造の開発と設計手法の構築を目指し、その一環としてコンクリートのひび割れを考慮

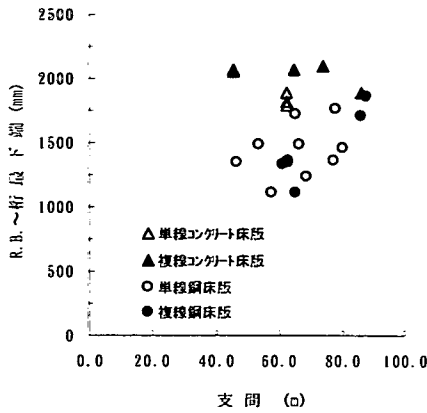


図-1 下路トラスの支間-(R.B. ~ 桁最下端)

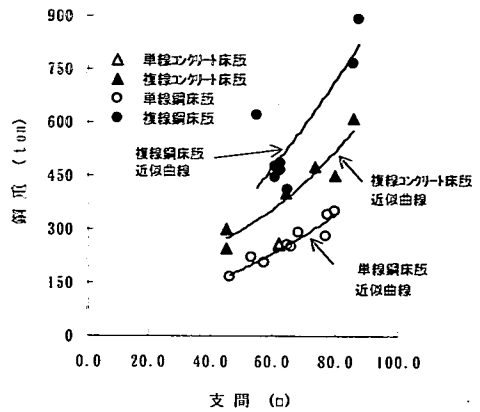


図-2 下路トラスの支間-鋼重

したSRC床版の力学特性を明確にすることを目的としている。すなわち、下路トラス橋の床組構造を対象に、SRC床版床組構造（以下、SRC床版形式）を模擬した供試体により、下弦材が引張りを受けた場合を想定した載荷実験を行うとともに、乾燥収縮実験を行うことによって、ひび割れ性状、コンクリートおよび鋼材のひずみ特性、鉄筋と下弦材の応力分担率等について検討を行った。

2. SRC床版床組構造の提案および課題

(1) 既往の床組構造

従前は、経済性の面において有利な開床式が多用されたが、近年、周辺の住環境に与える影響を考慮して、閉床式とすることが多くなってきた。

閉床式は鋼床版形式とコンクリート床版形式に大別される。鋼床版形式は、主にバラスト軌道に対して採用される床組構造である。初期の形式は横桁と縦桁で構成される格子桁に鋼板を張った形式のものであった⁴⁾が、現在は下弦材に鋼床版を直接取り付ける低床式鋼床版形式が用いられる⁵⁾。

また、コンクリート床版形式は、鋼床版の代わりにRC床版を配置したもので、その上にバラスト軌道、スラブ軌道等の軌道が敷設される。

(2) 閉床式床組構造の特徴

図-1は、既存の鋼鉄道下路トラス橋のうち、床組構造が閉床式の単線トラス橋および複線トラス橋24橋について、支間と床組形式毎のレールベース(R.B.) ~ 桁最下端寸法（以下、床高）の関係を示したものである。

図から、床高はトラス支間に依存することなく、

床組形式により決定されることが読み取れる。また、床高を最も小さく抑えられる構造は鋼床版形式である。鋼床版形式は単線橋梁と複線橋梁とで床高に差がない。一方、コンクリート床版形式は複線橋梁の床高が単線橋梁に比べ大きい。複線橋梁は、単線橋梁に比べ主構間隔が大きくなるため、横桁の桁高を大きくするか、横桁間隔を小さく密にする必要がある。鋼床版形式は後者の方法により複線床組構造に対応したものが多く、コンクリート床版形式では前者の構造が多いためこのような結果となっていると考えられる。コンクリート床版形式でも、横桁間隔を密な構造にすれば、さらに床高を低く抑えることが可能になる。

図-2は、支間100m以下の既設下路トラス橋における床組形式別の支間と橋側歩道等の付属物を除く橋桁全体鋼重の関係を示したものである。支間の増加とともに鋼重はほぼ比例して増加する。また、コンクリート床版形式の複線橋は鋼床版形式に比べ鋼重を小さくできることがわかる。なお、本図に示すコンクリート床版の横桁および縦桁は、非合成構造として設計されており、これを合成構造として設計すれば更に床組鋼重を低減できるものと考えられる。

(3) SRC床版形式の提案と課題

前節に述べたようにコンクリート床版形式は、横桁間隔を密にし、合成構造化することで、さらに床高を低く、また鋼重を低減できるものと考えられた。そこで、筆者らは、床組をSRC床版形式とする新しいタイプのトラス橋を提案した⁶⁾。提案したSRC床版形式は、床組の高さをできるだけ低く抑えるために縦桁を省略し、左右下弦材間に横桁を2.5m~3.0m間隔で配置した。横桁間は橋梁支点付近の一部を除き、床版厚30cmのRC構造を基本とした。下弦材と

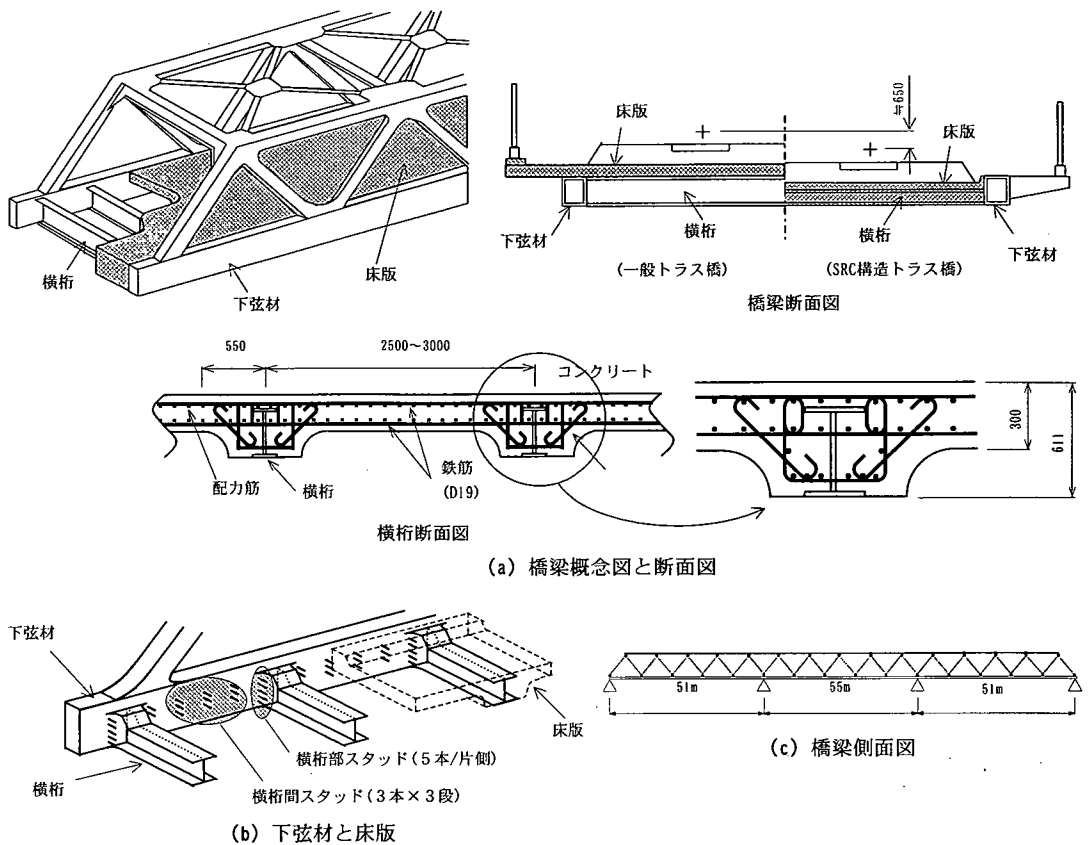


図-3 試設計橋梁一般図と床組構造

床版はスタッドジベルを介して結合した。横桁部では横桁に作用するせん断力を耐力比をもとに鋼材（横桁ウエブ）が受け持つ力と、コンクリートが受け持つ力とに按分し、コンクリートの受け持つせん断力に見合うスタッドジベルを配置した。なお、横桁間では、橋軸方向のずれ止め効果を期待せず、剥離防止の観点からスタッドジベル（ $\phi=22\text{mm}$ ）を橋軸方向に約500mmピッチ、鉛直方向に3段（約250mm間隔）配置した。概念図および床組構造を図-3に示す。本形式を従来形式と比較するため、以下に示す仮定のもとで実橋を想定した複線連続トラス橋（支間：51m+55m+51m）の試設計を行った。なお、下記の仮定は現行の設計の考え方⁷⁾に基づくものである。

- ① 主構の設計には、主構とコンクリート床版との合成効果を考慮しない。
- ② 横桁の設計は、SRC構造とし鉄筋コンクリート方式による終局曲げ理論に従うものとする。
- ③ 床版の設計は、横桁間を支間とする一方版と考える。
- ④ コンクリートの引張領域における鉄筋コンクリートのひび割れ幅^{8),9)}は、下弦材とスラブが全長にわたって結合され、橋軸方向に同じひずみが

生じるものとして算定する。

これらの試設計を通して、鋼床版形式および従来のコンクリート床版形式に比べて、SRC床版形式は、以下のような長所があると考えられる。

- ① 従来のコンクリート床版形式に比べ床高を少なくとも65cm程度低くできる。その結果、橋梁前後のアプローチ部の線路こう上範囲を500m（橋梁前後各250m）程度縮めることが可能となる（図-1および図-3）。
- ② SRC床版形式の複線鋼トラス橋は、鋼床版形式のものに比べ約40%、従来のコンクリート床版形式に比べても約20%の鋼重を低減できる（図-2）。合成構造として設計できれば、さらに鋼重の低減が見込まれる。
- ③ 主構内側の下弦材腹板をコンクリートにより覆うため、主構内側の下弦材腹板がむき出しになった従来形の床組構造に比べ、列車走行に伴う下弦材腹板の振動が小さくなると考えられる。このため、他の床組構造に比べ騒音軽減（構造音の低減）が期待できる（図-3）。
- ④ 床組下面をコンクリートで覆うことにより、塗装の塗り替え等、床組のメンテナンスの軽減が

表-1 実験に用いたコンクリートの配合

配合の種類	繊維混入率 (%)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単白量 (kg/m ³)							スランプ (cm)	air (%)
					#	C	S	G	AD	繊維	膨張材		
FLC	—	—	—	43.9	173	345	755	992	3.67	—	—	12.5	3.7
SFC	1.0	20.0	50.0	52.5	180	360	876	813	3.24	80.0	—	14.0	4.6
SFEC				52.4	180	330	870	813	3.24	80.0	30.0	12.5	4.7

期待できる。

一方、以下のような課題がある。

- ① 従来タイプのコンクリート床版形式が施工目地を適切に配置することにより、コンクリートの有害なひび割れに対処してきた実績があるのに対し、SRC床版形式は収縮目地を設けられない構造である。そのため、主構の変形が直接床版に伝わり（以下、主構作用）、床版コンクリートにひび割れが発生することに留意する必要がある。
- ② 主構と床版とは合成効果があると考えられるが、どの程度の合成効果があるか不明確である。
- ③ SRC床版形式は横桁腹板にスラブの主鉄筋を貫通させる必要があり、従来のコンクリート床版形式に比べ床版の鉄筋組立効率が低下する。

3. 実験概要

SRC床版形式を実現するためには、前章に述べた課題のうち、特に①および②の課題に対して明確な評価手法を確立する必要がある。

これらの課題について検討するため、本研究では、最初に床版に用いるコンクリート材料の検討を行った。次に、床組構造供試体を用いた下弦材引張り載荷実験を行った。実験では、前述した試設計の結果、最も影響の大きいと考えられた下弦材が軸引張りを受けた場合の床版のひび割れ性状、および下弦材と床版との合成効果を中心に検討を行った。さらに、床組構造模型を用いた乾燥収縮実験を行い、主構と横桁により拘束されるSRC床版に及ぼす乾燥収縮の影響を検討した。

4. SRC床版形式に用いる材料の検討

(1) 材料の選定

SRC床版は、前述したように、トラス主構作用による軸引張力、および乾燥収縮によるひび割れが懸念される。

この問題に関連して、瀬野ら^{10), 11)}は、新交通システムの合成桁橋梁を対象に、鋼桁とコンクリート床版との合成効果がコンクリートの乾燥収縮による

表-2 物性値試験結果

材料	試験種別	圧縮強度平均		静弾性係数 (N/mm ²)	ポアソン比	曲げ強度		曲げ靱性係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
		4#	12#			4#	12#		
①	FLC	35.6	44.2	30.9	0.159	4.92	3.80	—	2.84
②	SFC	34.2	40.3	25.5	0.169	4.53	4.39	3.55	2.66
③	SFEC	38.9	45.2	27.4	0.161	5.59	5.62	4.44	3.26

表中の値は標準水中養生の値（供試体3体の平均値）を示す。ただし、*は現場水中養生の値を示す。

ひび割れに及ぼす影響を実験的に検討している。それによれば、ひび割れ発生を抑制するために膨張材を添加し、発生後のひび割れ幅を制御するために鋼繊維を添加すれば良好な結果が得られるとしている。

これら既往の研究成果を参考に、実験に使用するコンクリート材料として、普通コンクリート（以下、PLC）のほか、ひび割れに対する抵抗性に優れている鋼繊維補強コンクリート（以下、SFC）および鋼繊維補強膨張コンクリート（以下、SFEC）の3種類を選定し、その検討を行った。なお、鋼繊維補強コンクリートに混入する鋼繊維は、インデント加工された繊維長30mm、アスペクト比50のものを採用した。鋼繊維の混入量は、文献¹²⁾他に示される既設構造物への使用実績等を参考に、体積比1.0%とした。コンクリートの設計基準強度を27N/mm²とし、試験練りにより配合を設定した。本実験で使用するコンクリート配合を表-1に示す。

(2) 材料特性

a) 圧縮強度および静弾性係数

標準養生による材齢28日のPLC、SFC、SFECの3配合に対して圧縮および静弾性係数試験を実施した。試験方法はJSCE-G502-1988「コンクリートの静弾性係数試験方法」（単調増加載荷による方法）に準じた。

試験結果を表-2に示す。材齢28日における圧縮強度は、何れの材料も35N/mm²前後であるが、SFECは多少大きな値を示した。また、ポアソン比は、何れの材料も0.16~0.17程度の範囲にあった。

b) 曲げ強度および曲げタフネス

標準養生による材齢28日の3配合の曲げ強度および曲げタフネス試験を実施した。試験は、JSCE-G552-1983「鋼繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法」に準じた。なお、供試体寸法は150×150×530mmである。

試験結果を表-2に示す。一般にSFCの曲げ強度は、PLCに比べ大きいことが知られている¹²⁾。試験の結果、現場水中養生供試体の曲げ強度は、SFCおよびSFECがPLCに比べ20%~50%大きい結果となったが、標準水中養生供試体では、SFCがPLCに比べ約10%小さい値となり、既往の結果に比べ若干差異があった。

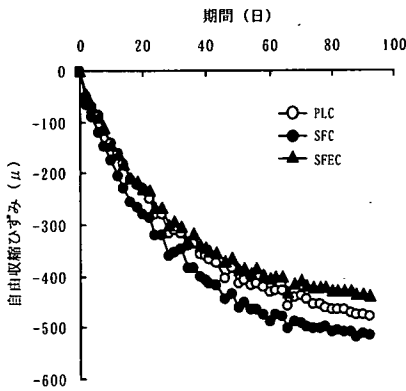


図-4 コンクリートの自由収縮ひずみの経時変化

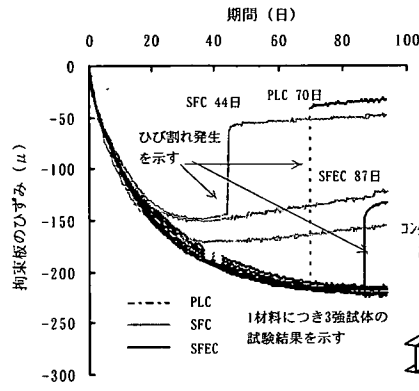


図-6 拘束収縮実験の拘束板ひずみ

拘束収縮実験概略図

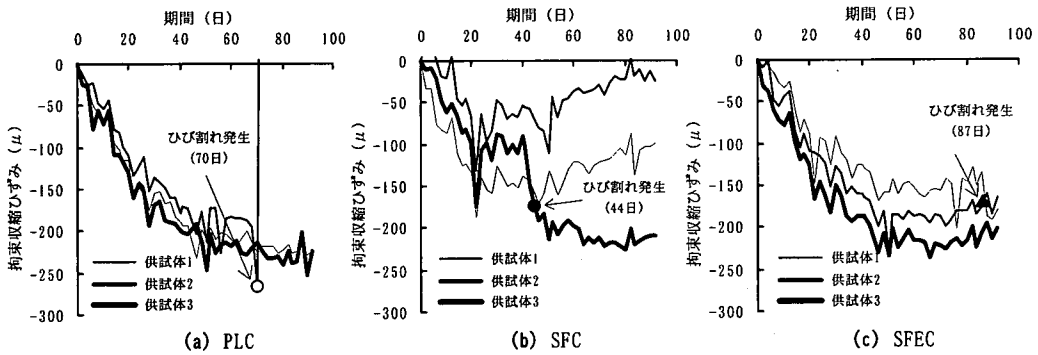


図-5 コンクリートの拘束収縮ひずみの経時変化

曲げ靱性係数¹³⁾は、SFECがSFCに比べ20～30%大きい値を示した。

c) 引張強度

100×100×400mmの供試体を用いて直接引張試験を実施した。表-2に示すように、3配合に対する引張強度は2.66～3.26N/mm²の範囲にあった。供試体SFECの引張強度が最も大きく、供試体PLCと供試体SFCでは前者が多少大きい値を示した。

d) 拘束乾燥収縮

試験は、JIS原案「コンクリートの乾燥収縮試験方法(案)」に準じて行った。供試体は、PLC、SFC、SFECの3配合につき各3体とした。

コンクリートの自由収縮ひずみの経時変化を図-4に、コンクリートの拘束収縮ひずみの経時変化を図-5に、また拘束板の長手方向のひずみを図-6に示す。なお、コンクリート打設後7日間の湿潤養生を行った後、コンクリート打設後8日目から計測を開始し、これを本図に示す乾燥収縮材齢の開始日とした。

本試験の結果から以下のことがわかる。

① SFCの自由収縮ひずみは、PLCに比べ大きくなるが、これに膨張材を加えたSFECの収縮率は

PLCに比べ若干小さくなる(図-4)。

- ② コンクリートの拘束収縮ひずみは、50日程度経過すればほぼ収束にむかい、PLCの3ヶ月間の最大収縮ひずみは約240μでバラツキも小さかった。SFCは乾燥材齢3週以降ひずみのバラツキが大きく、最大収縮ひずみは130～230μであった。SFECのひずみは若干のバラツキが見られるものの、3ヶ月間の最大収縮ひずみは200～230μであった(図-5)。なお、PLCに比べ、SFCおよびSFECのひび割れ発生時のコンクリート収縮ひずみに変化が見られないのは、PLCのひび割れがコンクリートひずみ計測区間に発生したのに対して、SFCおよびSFECのひび割れは計測区間外にひび割れが発生したためである。
- ③ PLC、SFC、SFECとも供試体3体の内、各1体に図-5、図-6に示す材齢でひび割れが発生した。ひび割れの発生時期は、SFCが最も早く44日で発生した。以下、PLC(70日)、SFEC(87日)の順であった。また、乾燥材齢90日におけるひび割れ幅は、PLCが最も大きく0.35mmであ

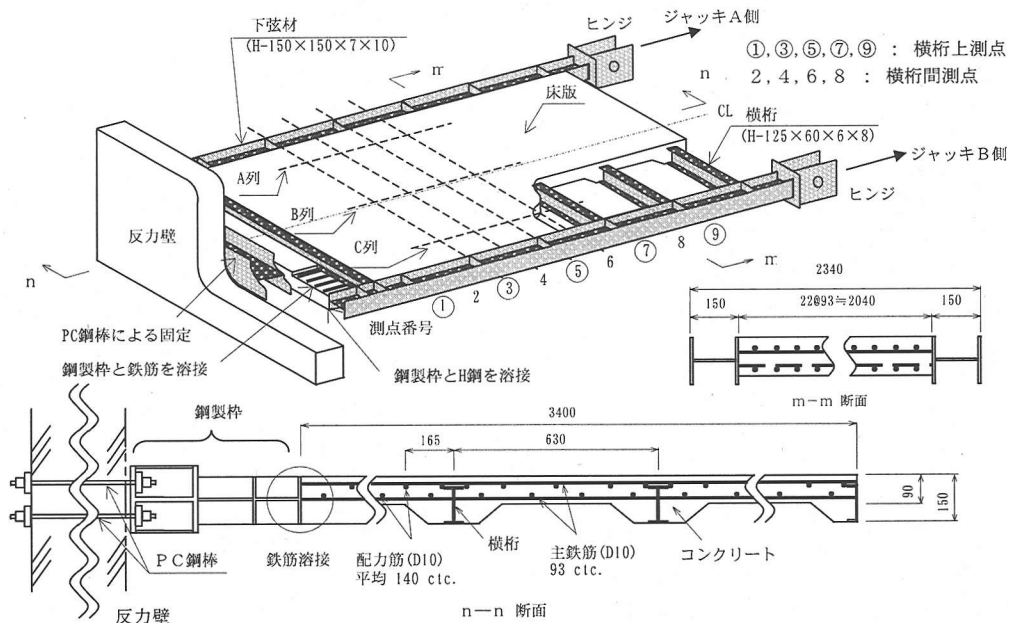


図-7 下弦材の引張応力载荷実験用供試体

った。以下、SFC 0.25mm, SFEC 0.20mmの順であった。

- ④ 乾燥材齢3ヶ月の拘束板ひずみは、PLC, SFECが $200\mu\sim 240\mu$, SFCは $150\mu\sim 180\mu$ である。供試体にひび割れが発生するとコンクリートの収縮による力が解放され、拘束板ひずみは急激に低下するが、その割合はSFCが 150μ から 60μ へ約60%低下し、SFECが 230μ から 150μ へ約35%低下した。一方、PLCは低下率が大きく、 220μ から 50μ へと約80%低下した(図-6)。

e) まとめ

SRC床版に適用する材料を選定するために行った上記試験の結果、以下の点が明らかとなった。

- ① 鋼繊維を混入した供試体は、混入しないものに比較して、圧縮強度および引張強度がわずかであるが低下した。しかし、曲げ強度および曲げ靱性係数は改善され、また拘束収縮ひずみによるひび割れ幅も小さくなった。
- ② さらに膨脹材を混入した供試体は、他の供試体に比べ曲げ靱性係数、引張強度および曲げ強度が大きくなった。また、他の供試体に比べひび割れ発生時期が遅く、その幅も小さい。
- ③ 拘束収縮試験の結果 d)④からわかるように、鋼繊維を混入すると、ひび割れが発生しても力を伝達する性能が高くなる。

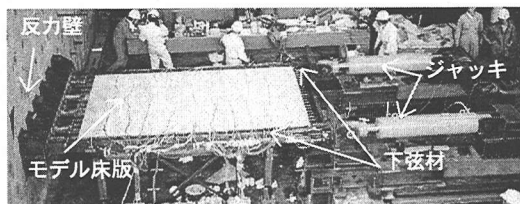


写真-1 引張载荷実験

5. 床組構造供試体を用いた引張载荷実験

(1) 実験概要

a) 実験方法

床組構造供試体を用いた下弦材の引張载荷実験状況を写真-1に示す。実験は、モデル床版の一方の端を鋼製枠を介しPC鋼棒により反力壁に固定し、下弦材を模擬したH形鋼の他端をヒンジ支持し、床版に面外の曲げを生じさせないようにジャッキにより引張ることにより実施した。

b) 材料および実験供試体

下弦材の引張载荷実験は、PLCを用いた供試体(以下、供試体PLRC)および前章の材料試験で良好な性状を示したSFECを用いた供試体(以下、供試体SFREC)について行った。下弦材の引張载荷実験用

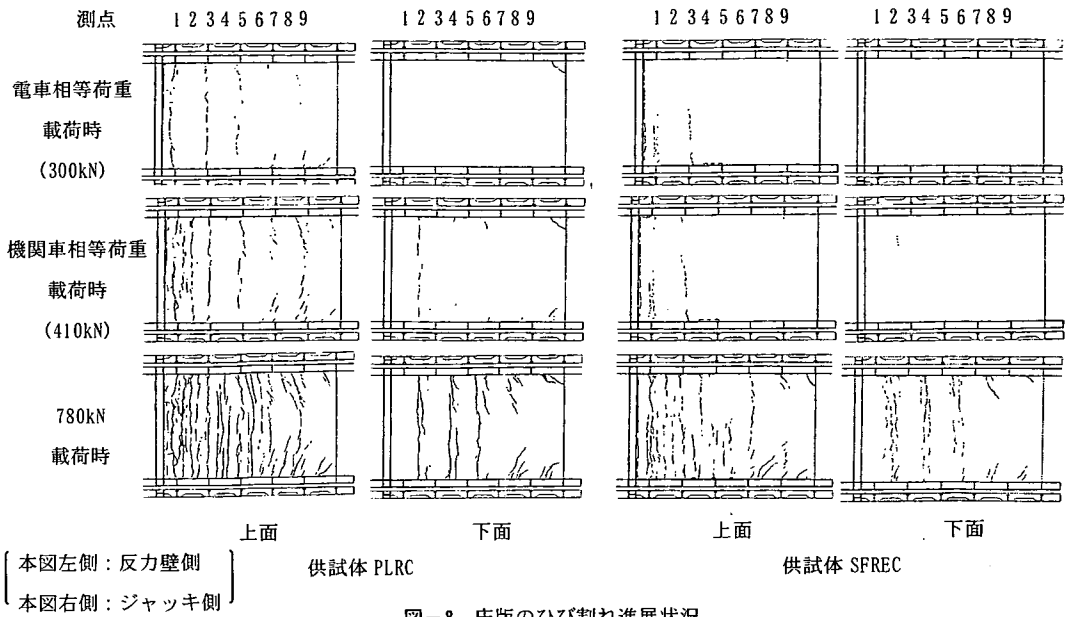


図-8 床版のひび割れ進展状況

供試体を図-7に示す。供試体は以下の条件を満足するように設計した。

- ① 下弦材の鋼材比(3.67%)を試設計橋梁のそれに合致させる。
- ② 横桁の鋼材比(2.0%)を試設計橋梁のそれに合致させる。
- ③ RC床版の鉄筋比は橋軸方向(1.54%)および橋軸直角方向(0.56%)とも試設計橋梁のそれに合致させる。

なお、供試体はコンクリート打設後4週間の湿潤養生の後、引張荷重実験に用いた。

c) 載荷荷重の設定

床版と下弦材を非合成とした前述の試設計において、列車が載荷された時の軸力の変動の影響が最も大きな部材の軸力をもとに、実験における載荷荷重を設定した。すなわち、試設計橋梁において、設計荷重(機関車荷重)作用時に、軸力による下弦材の応力が最大となるのは側径間中央部で、その最大応力から合成前死荷重応力を除いた下弦材応力度は $104\text{N}/\text{mm}^2$ となり、それに相当する荷重(410 kN)を供試体の設計引張荷重(以下、機関車相当荷重)として設定した。実験最大引張荷重は、供試体の機関車相当荷重の約2.5倍(980kN)とした。荷重載荷は、784kNまでが19.6kNピッチ、784kNから882kNまでが49kNピッチ、その後980kNの引張力を作用させた。なお、同様に算出した電車設計荷重に相当する荷重(以下、電車相当荷重)は、300kNである。

d) 測定項目

実験では、図-7に示す各測点について以下の測定

を行った。

- ① 各載荷荷重における床版コンクリートのひび割れ進展状況の観察
- ② 床版上面の橋軸方向に予め250mm間隔のターゲットを設置し、これらの間隔の変化を計測することによる床版コンクリート上面の橋軸方向ひずみの測定
- ③ 主鉄筋のひずみ測定
- ④ 下弦材の軸方向(引張荷重載荷方向)ひずみ測定
- ⑤ 横桁の軸方向(引張荷重載荷方向に直角)のひずみ測定
- ⑥ スタッドジベルの軸方向のひずみ測定

(2) 実験結果および考察

実験結果の評価は供試体の中間部の測点2から測点6間で行うことを基本とした。これは、反力壁と床版との固定部、およびジャッキ側端部の影響の小さな範囲として設定したためである。

a) ひび割れの発生および進展状況

図-8は、それぞれの供試体における床版コンクリートのひび割れ発生および進展状況を示したものである。図は、電車相当荷重(300 kN)、機関車相当荷重(410kN)および供試体SFRECのひび割れが全域に分布する荷重(780kN)に対応する。また、図-9は、それぞれの供試体の測点2、測点3、測点4、測点5および測点6に生じたひび割れ長さを荷重載荷段階毎に累計し、引張荷重との関係を示したものである。

実験時の観察および上記図より以下のことがわか

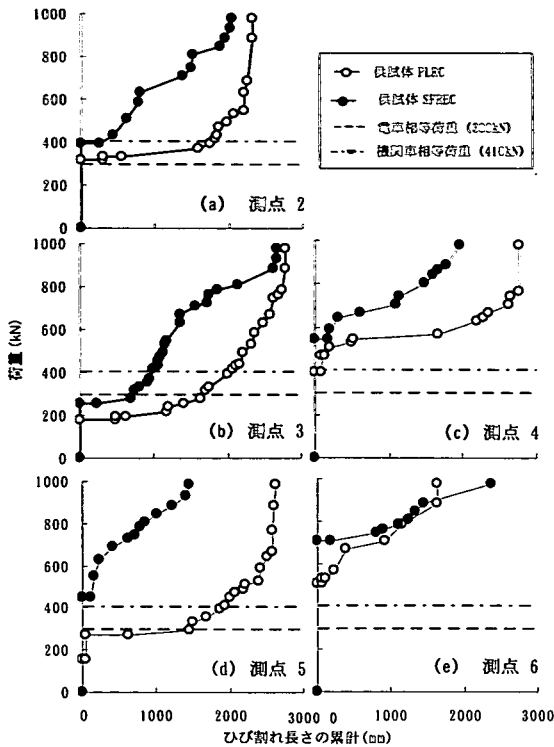


図-9 ひび割れ長さの累計とひび割れ発生荷重

る。

- ① ひび割れは、両供試体とも、最初に測点3の横桁上に発生し、順次ジャッキ側の横桁上に発生した。横桁上のひび割れは、鋼繊維を混入しない供試体 PLRC が比較的小さな約 180 kN の荷重で発生し、供試体 SFREC が約 270 kN で発生した。このように、横桁上のひび割れの発生荷重は、両供試体で異なっていた (図-8 および図-9)。
- ② その後、横桁間にもひび割れの発生が見られた。横桁間のひび割れは、測点2において、供試体 PLRC が約 330kN で、供試体 SFREC が約 400 kN で発生した。一方、測点4,6 でひび割れが発生した荷重は、それぞれ供試体 PLRC が約 400kN, 約 500kN, 供試体 SFREC が約 550kN, 約 720kN であった。このように横桁上と同様、反力壁に近い測点ほど小さな荷重でひび割れが発生したが、これは床版と反力壁の拘束の影響によるものと考えられる (図-8 および図-9)。
- ③ 供試体 PLRC と供試体 SFREC のひび割れの進展状況は明らかに異なっていた。すなわち、供試体 PLRC では、300 kN より小さな荷重レベルで横桁上のひび割れがかなり進行したのに対し、供試体 SFREC では 400kN を超える荷重レベルでひび割れが進行した。なお、780 kN を超える荷重レ

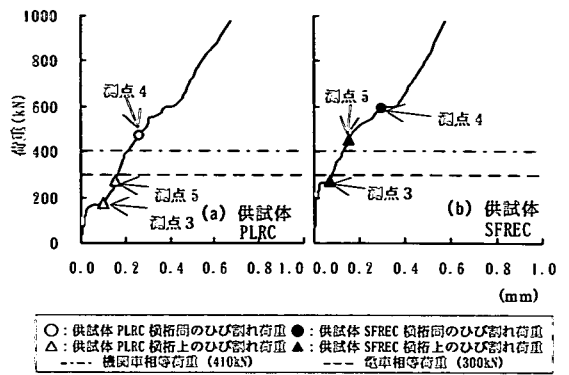


図-10 荷重-床版変形 (測点3-5)

ベルでは、両供試体ともひび割れがほぼ全面に分布した (図-8 および図-9)。

- ④ ひび割れに対する目視観察結果によれば、ある引張荷重でひび割れが発生した後、荷重の増加とともにひび割れ幅が大きくなり、さらに載荷荷重が増加すると既に発生したひび割れ間に新しいひび割れが発生し、これに伴って一旦ひび割れ幅は縮小するものの、荷重の増加とともに再びひび割れ幅が大きくなる。上記ひび割れ進展パターンを繰り返しながらひび割れ本数が増加し、供試体 PLRC で約 780kN、供試体 SFREC で約 880kN 以上では、ひび割れ本数が殆んど増加しなくなった (図-9)。980kN 載荷時における供試体 PLRC のひび割れ幅の大部分が 0.2mm~0.3mm であったのに対して、供試体 SFREC のひび割れ幅は、0.05mm~0.1mm であった。

b) ひび割れの発生と列車荷重との関係

図-8 から、ひび割れの発生状況と列車荷重との関係を以下のようにまとめることができる。

- ① 電車相当荷重の300kN載荷では、供試体 PLRC の全ての横桁上面にひび割れが発生した。一方、供試体 SFREC には反力壁に近い測点にわずかに発生した。
- ② 機関車相当荷重の410kN載荷では、供試体 PLRC のひび割れが横桁上および一部横桁間に進行したのに対し、供試体 SFREC のひび割れにはほとんど変化が見られなかった。なお、このときのひび割れ幅は、供試体 PLRC で最大 0.15mm であった。また、供試体 SFREC では、目視 (アセトン塗布による確認) でようやく観察できる程度の幅であった。

以上のように、供試体 PLRC では供試体 SFREC に比べてひび割れ発生荷重が小さく電車相当荷重以下でもかなりのひび割れが見られたのに対し、供試体 SFREC では、機関車相当荷重でも目視でようやく観

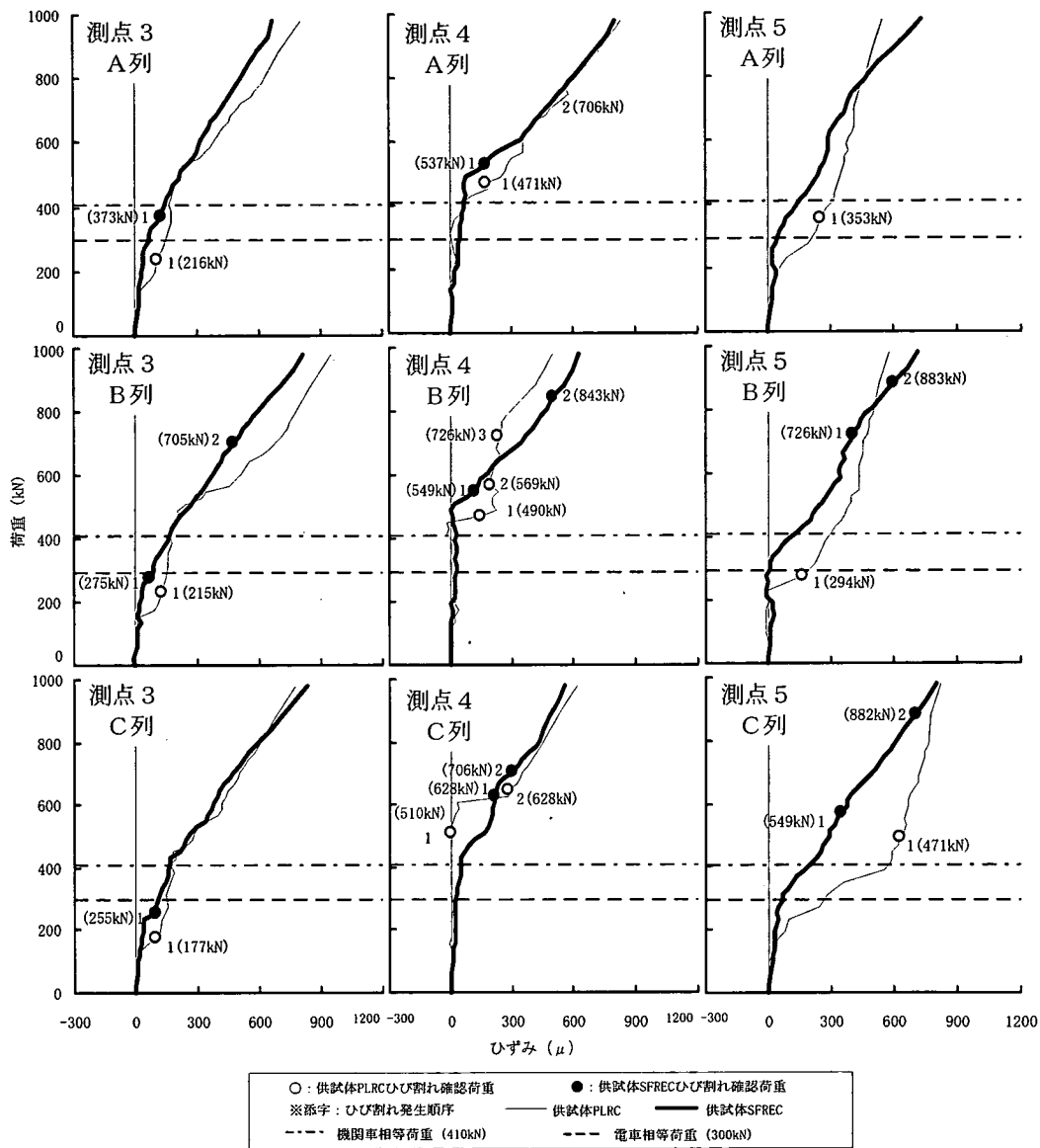


図-11 コンクリートひずみとひび割れ発生荷重

察できる幅のひび割れがわずかに発生した程度であった。

c) 床版の軸方向の変形とひび割れ

図-10は載荷荷重と測点3-5間の床版の下弦材軸方向の伸びと各測点のひび割れ進展状況を示したものである。下弦材軸方向の伸び量は、供試体PLRCが荷重約180kNおよび約580kNで、また供試体SFRECが荷重約270kNおよび約600kNで急激に増加した。このような変形の急増は、床版コンクリートのひび割れと密接に関連している。すなわち、ひび割れの発生によってコンクリートが負担する荷重

を下弦材と主鉄筋が受け持つようになり、変形も急増したものと考えられる。

d) コンクリートひずみとひび割れ

コンクリート床版の表面に引張載荷荷重方向に250mm間隔にターゲットを設置し、その間隔の変化を計測することにより、床版両サイド(列A, C)と床版中央(列B)の載荷方向ひずみを載荷ステップ毎に測定した(図-7)。測点3, 4および測点5におけるターゲット間の荷重-ひずみ曲線と、目視によるひび割れ発生荷重を図-11に示す。

荷重の小さい範囲では、両供試体とも荷重とともに

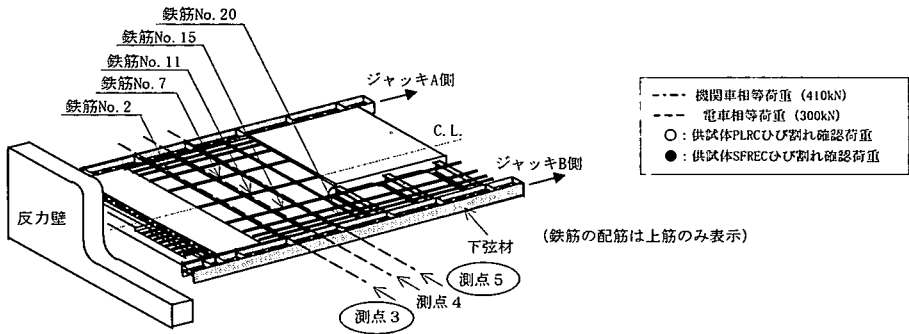
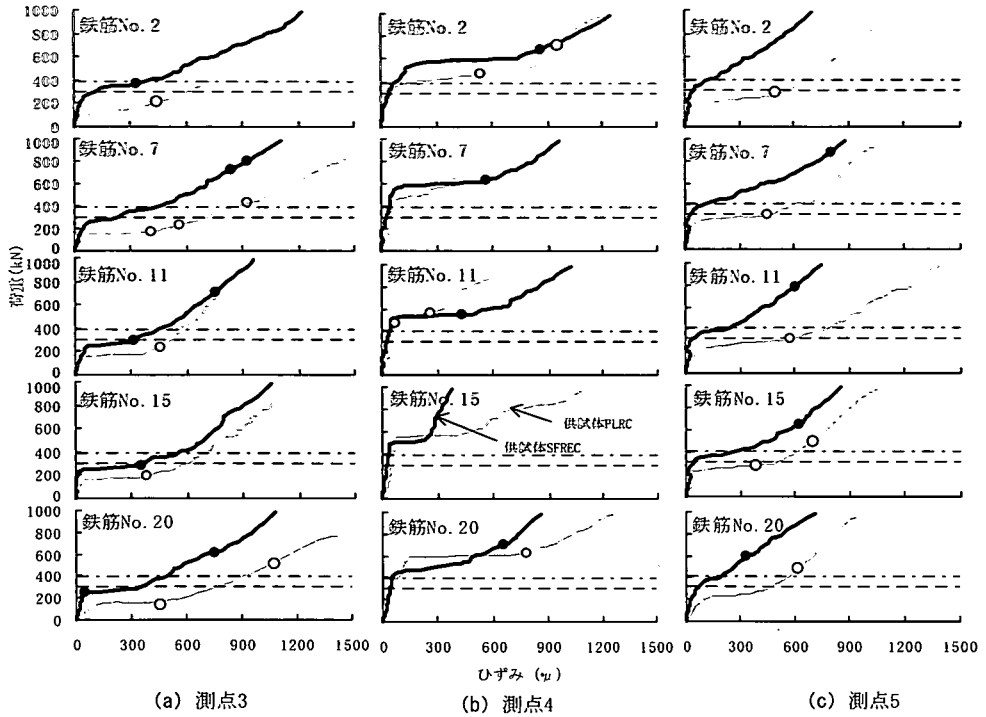


図-12 鉄筋ひずみとひび割れ発生荷重

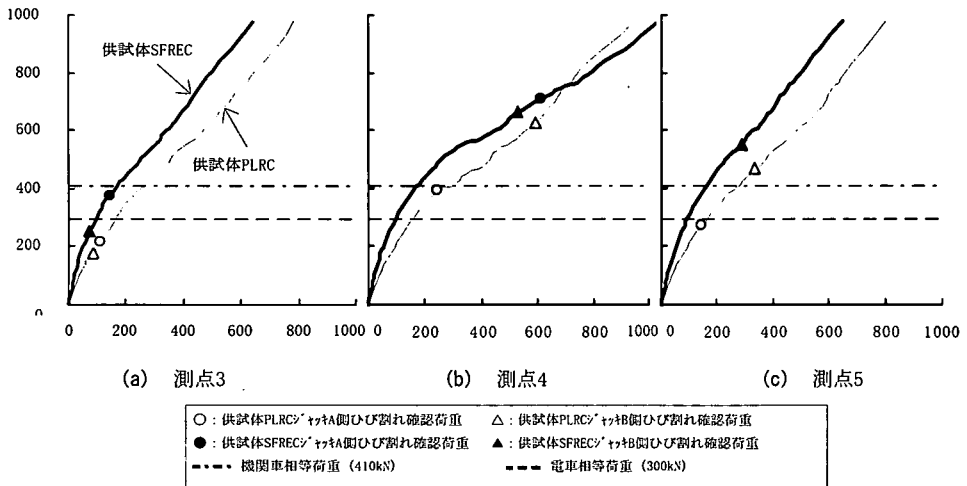


図-13 下弦材ひずみとひび割れ発生荷重

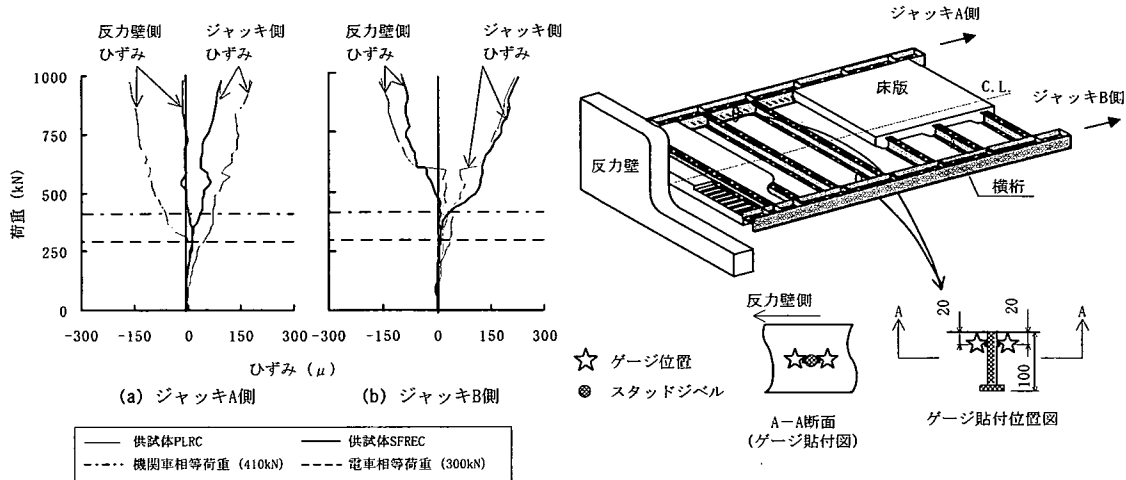


図-14 スタッドジベルのひずみ

に緩やかにひずみが増加していくが、ある荷重レベルに達するとひずみは急激に増加している。この時、供試体PLRCでは、供試体SFRECに比べてひずみが小さな荷重でかつ階段状に増加した。一方、供試体SFRECでは、比較的滑らかに増加している。

このような両者の挙動の違いは、鋼繊維の有無によるひび割れの発生挙動の違いに起因するものと考えられる。すなわち、両供試体とも、ひび割れの発生まではコンクリートのひずみが増加し、ある限界値に達してひび割れが発生するが、鋼繊維コンクリートでは、目視可能なひび割れが発生する限界値が大きくなるとともに、ひび割れ発生後も鋼繊維を介してある程度力が伝達されるために、このような差が生じたものと考えられる。

e) 鉄筋ひずみとコンクリートのひび割れ

横桁直上の測点3、測点5および横桁間の測点4における鉄筋ひずみと引張荷重の関係を図-12に示す。

横桁上の各測点（測点3および測点5）の鉄筋ひずみは、両供試体ともコンクリートひずみと同様に荷重とともに緩やかに増加していくが、ある荷重段階で急増している。このときのひずみは、供試体PLRCの方が大きい。両供試体におけるこのような鉄筋ひずみの挙動の差は、ひび割れの発生に伴ってコンクリートと鉄筋で荷重の負担が変化していることに対応しているものと考えられる。すなわち、小さな荷重範囲ではコンクリートと鉄筋の双方が荷重を分担して負担しているのに対し、ひび割れの発生に伴ってコンクリートが負担していた応力を鉄筋が負担するようになるために鉄筋ひずみが急増するものと考えられる。したがって、早期にかつ大きなひび割れの発生する供試体PLRCの方が小さな荷重でひずみが急増し、またその値も大きくなるものと考えら

れる。

一方、横桁間（測点4）では、両者に明確な差がない。

なお、図-12に示すコンクリートのひび割れ発生荷重は目視によりひび割れを確認した時の荷重である。したがって、実際には目に見えない微細なひび割れが床版に発生すると同時に鉄筋ひずみは急増するものと考えられ、そのひび割れ幅が目視可能なひび割れ幅に達したときには、すでにコンクリートが負担する応力の大部分は、鉄筋や下弦材に移行しているものと思われる。

f) 下弦材ひずみとコンクリートのひび割れ

測点3、測点4および測点5における下弦材ひずみとコンクリートのひび割れ荷重の関係を図-13に示す。本図に示す下弦材ひずみ値は、ジャッキA側とジャッキB側の下弦材ひずみ値を平均したものである。図中に示すひび割れを確認した時の荷重は、ジャッキA側近傍に発生するひび割れとジャッキB側近傍に発生するひび割れを分けて示した。

図から、荷重の比較的小さな段階から両供試体で差が生じること、また、800kN程度以下の同じ荷重であれば供試体PLRCの下弦材ひずみの方が供試体SFRECより大きいことがわかる。機関車相当荷重410kNにおいて、後者は前者の約60%である。これは、供試体PLRCに比べて供試体SFRECの方がコンクリート床版の荷重を負担する割合が大きいことを意味しているものと考えられる。また、荷重が大きくなるにつれて下弦材ひずみの増加割合が大きくなるが、これは床版に発生するひび割れの進行とともに、下弦材の荷重負担割合が増加したものと考えられる。なお、下弦材ひずみにおいても鉄筋ひずみ同様、目視できない微細なひび割れが発生すると同時に下弦

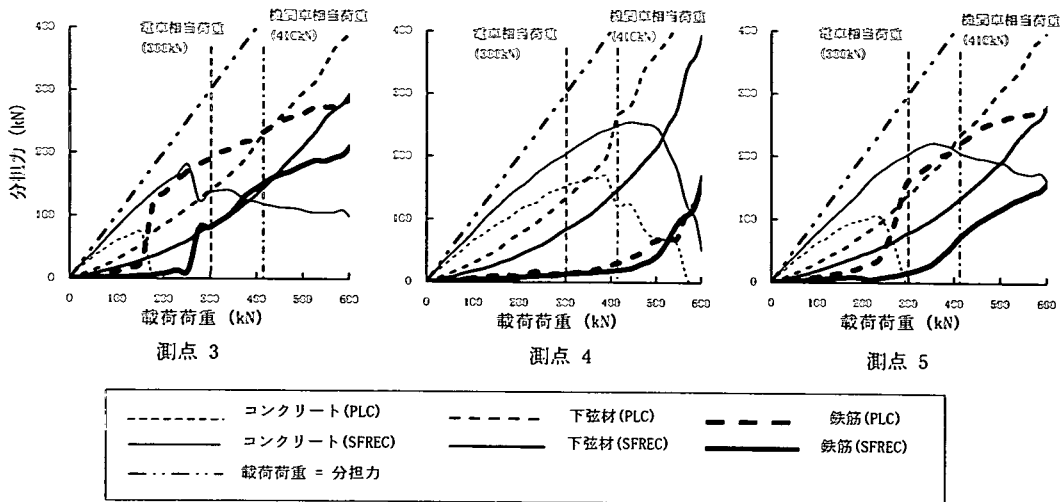


図-15 鉄筋、下弦材、コンクリートの分担力

材のひずみが急増するものと思われる。

また、両供試体とも、試設計において下弦材のみが引張り荷重を負担すると仮定して算出した機関車荷重作用時の下弦材ひずみ 507μ に比べ、かなり小さい値となっている。このことは、通常の列車荷重のレベルでは、床版が引張部材として機能していることを示している。

g) スタッドジベルのひずみ

測点4におけるスタッドジベルのひずみと引張り荷重の関係を図-14に示す。

図から、荷重が小さい領域ではスタッドにひずみがほとんど生じていないが、ある荷重レベルに達すると急激に曲げひずみが増加することがわかる。これは、荷重が比較的小さい領域では、下弦材ウェブとコンクリートが一緒になって挙動し、その付着によりスタッドにひずみが発生しないが、荷重が大きくなり、付着が切れたためにスタッドに曲げひずみが生じたものと考えられる¹⁴⁾。なお、ひずみが急増する荷重は、供試体PLRCで約250kN、供試体SFRECでは約350kNであった。すなわち、供試体PLRCでは電車相当荷重より小さな荷重でひずみが急増したのに対し、供試体SFRECではほぼ機関車相当荷重でひずみが急増している。コンクリートのひび割れの発生に伴って、下弦材と床版の荷重負担が異なり両者の伸びに差が生じることが、このような付着切れが生じる原因と考えられる。そのため、早期にコンクリートにひび割れが生じる供試体PLRCの方が、付着切れが発生する荷重も小さくなるものと考えられる。

h) 荷重の負担割合の検討

横桁上(測点3, 5)と横桁間(測点4)において、下弦材、鉄筋およびコンクリートが荷重をどの程度負担しているか(以下、負担荷重)を下記の仮定に

従って算出した。

- ① 下弦材の負担荷重は、下弦材のひずみが下弦材断面に一樣に分布するものとして平均ひずみから求める。
- ② 鉄筋の負担荷重は、各鉄筋ひずみから求まる鉄筋負担力を合算して求める。
- ③ コンクリートの負担荷重は、下弦材引張り載荷荷重から、①および②から求めた負担荷重を差引いた値とする。

この方法は、必ずしも精度のよいものではないが、各部材が負担する荷重の傾向を把握することはできると考えられる。図-15は、そのように算出した各部材の負担荷重を、荷重段階ごとに求めたものである。

コンクリートの負担荷重は、荷重の小さな段階では載荷荷重とともに増加するものの、ある荷重レベルを越えると減少する。これは供試体PLRCにおいてより顕著である。ひび割れの発生に伴って、コンクリートの負担していた荷重が下弦材と鉄筋に移行したためと考えられる。

鉄筋の負担荷重に関しては、荷重の小さな段階では非常に小さいが、ある荷重以上になると荷重の増加と共に増加していく。また、横桁上で大きくなっている。横桁上で大きくなるのは、ひび割れがこの部分に生じ易く、かつひび割れ幅も大きくなり、鉄筋が負担する荷重も大きくなるものと考えられる。

載荷荷重(98kN以上)に対する下弦材の荷重負担率は、荷重の小さい領域では、それほど供試体PLRCと供試体SFRECで差がないが、設計荷重付近では、前者で全荷重の約60%、後者で約35%であった。

これらの結果から、設計荷重が作用する領域では、SRC床版構造は荷重をコンクリートが分担すること、

特に供試体SFRECでは比較的大きな荷重領域までコンクリートの分担が期待できると考えられる。

6. 乾燥収縮実験

今回提案したSRC床版形式は、これまでに述べたような主構作用による他、目地がないため乾燥収縮に伴うひび割れの影響も懸念された。そこで、その影響を把握するために大型供試体を用いた乾燥収縮実験を行った。

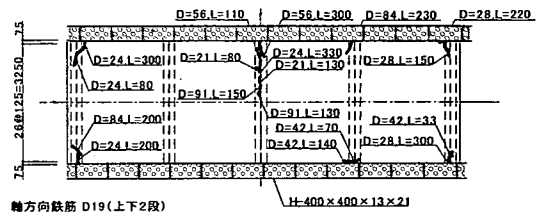
(1) 実験概要

本実験は、乾燥収縮に伴うSRC床版の収縮率を推定するとともに、コンクリート材料の違いによるひび割れ進展状況を明らかにすることを目的としている。

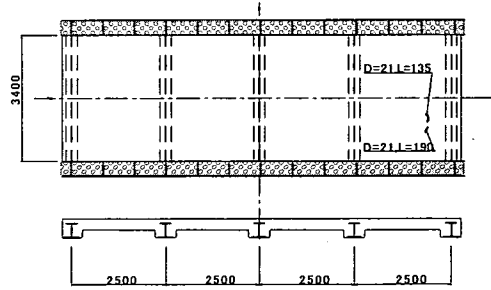
実験に用いたコンクリート材料は、PLCとSFRECの2種類で、その配合は前記表-1と同様である。供試体は、下弦材の引張載荷実験用供試体と同様に、下弦材と横桁の鋼材比、橋軸と橋軸直角方向の鉄筋比を試設計橋梁に合致させ、試設計橋梁のほぼ1/2の床版幅とした。床版厚は試設計橋梁と同一の30cmとし、5本の横桁を配置した。以後、材料にPLCを用いた供試体を供試体D-PLRC、SFRECを用いたものを供試体D-SFRECと呼ぶ。乾燥収縮実験に用いた大型モデル床版を図-16に示す。本実験における計測項目は以下のとおりである。

- ① 目視によるひび割れの観察
- ② 床版上面の橋軸方向に予め250mm間隔のターゲットを設置し、これらの間隔の変化を計測することによる床版コンクリート上面の橋軸方向ひずみの測定
- ③ 床版上面側の主鉄筋および配力筋の軸方向ひずみの測定
- ④ 中央部横桁の軸方向のひずみ測定
- ⑤ 横桁取付部および横桁間の下弦材の軸方向のひずみ測定
- ⑥ 下弦材に溶植したスタッドジベルの軸方向のひずみ測定

本実験におけるコンクリートのひずみ測定は、コンクリート打設後7日間の湿潤養生を行った後、1日目（コンクリート打設後8日目）、3日目（同10日目）、5日目（同12日目）およびその後は週1回の割合で、約3ヶ月間実施した。計測期間を3ヶ月としたのは、本実験に併行して床版打設材料と同一材料を用いたJIS原案による乾燥収縮試験を実施し、4.(2)dの結果を得たためである。これによれば乾



(a) 供試体D-PLRC



(b) 供試体D-SFREC

D: コンクリート打設後8日目以降の累積日数(日)
L: 計測時に新たに発見されたひびわれ長さ(mm)

図-16 乾燥収縮実験供試体およびひび割れ進展図

燥収縮は概ね50日程度経過すればほぼ収縮が収束している。このことから、3ヶ月間のコンクリートの収縮ひずみを計測することにより乾燥収縮によるコンクリートのひび割れ性状は推定できるものと考えた。

大型モデル床版のひび割れ調査は、乾燥材齢1日、3日、5日およびその後は週1回の割合で目視により行った。なお、コンクリート打設後8日目を乾燥収縮開始日とし、乾燥収縮開始日からの累積日数を乾燥材齢とした。

(2) 実験結果および考察

a) コンクリートのひび割れ進展状況

供試体D-PLRCおよび供試体D-SFRECのコンクリート表面のひび割れ観察結果を図-16に示す。

図-16(a)によれば、供試体D-PLRCモデル上面では、乾燥材齢21日に中央横桁上の橋軸直角方向ひび割れが確認された。このひび割れは材齢とともに徐々に進展し、乾燥材齢91日までにモデル床版幅3.4mの半分程度の範囲にまで及んだ。また、乾燥材齢28日に床版四隅に斜めひび割れが確認された。これは、ひび割れ形状としてはスラブの乾燥収縮ひび割れでよく見られるものであった¹⁵⁾。今回観察されたひび割れ幅は0.05mm~0.1mmであった。なお、床版下面のひび割れは確認されなかった。

供試体D-SFRECの上面では、乾燥材齢28日に図-16(b)に示す部位に0.05mm~0.1mm幅のひび割れが確

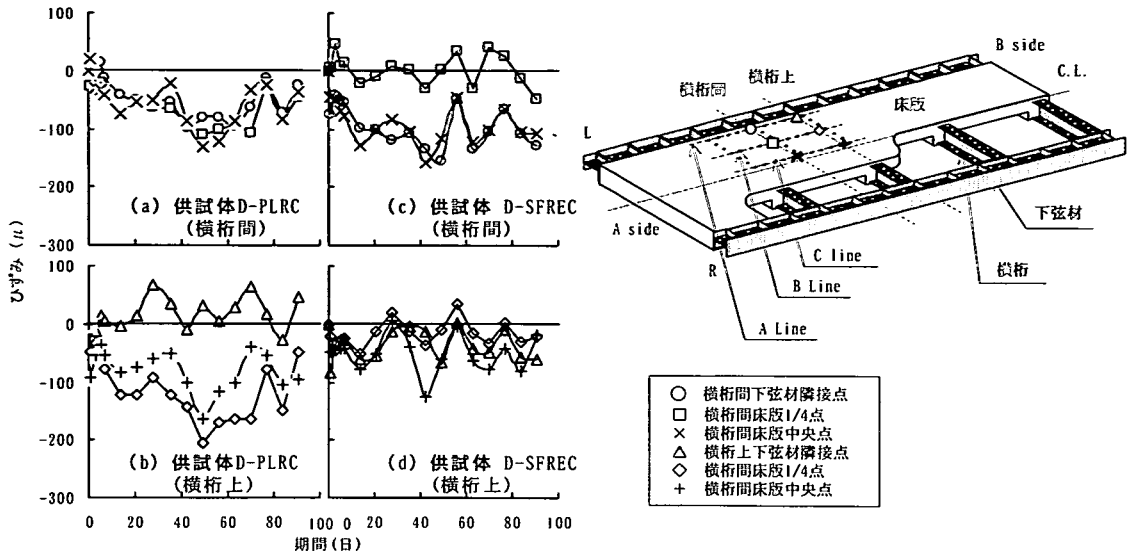


図-17 コンクリート表面ひずみの経時変化（橋軸方向）

認められたものの、その後ひび割れ進展は確認されず、供試体D-PLRCと比較して非常に少ないものであった。床版下面のひび割れも認められなかった。

このような両供試体のひび割れ発生状況の差は、鋼繊維混入によるひび割れ幅の抑制効果の有無に起因するものと考えられる。

b) コンクリートひずみ

コンクリート表面に予め250mm間隔に設置したターゲット間の変化を計測することにより求めたコンクリートの橋軸方向ひずみを図-17に示す。

コンクリートひずみは温度補正を行っているが、湿度等に対しては未補正である。これらにひび割れ進展に伴う応力再配分と測定誤差も加わって、図に示すように、バラツキの大きな結果となったものと考えられる。供試体D-PLRCおよび供試体D-SFRECは、総じて乾燥開始日から徐々に収縮し、90日後の収縮率は50～150 μ 程度であった。同一材齢における収縮ひずみは供試体D-SFRECが供試体D-PLRCに比べ横桁上において若干小さくなったが、有意な差は認められなかった。すなわち、a)に述べたひび割れの発生状況は両供試体に差があるのに対して、コンクリートのひずみは両供試体に差がない。これは鋼繊維を入れることにより、目視確認できるひび割れが発生するひずみの限界値が大きくなるためと考えられる。

7. 実験結果の設計への適用

ここでは、引張載荷実験および乾燥収縮実験から

得られた知見の実設計への適用について述べる。

- ① 引張載荷実験から得られた供試体PLRCの機関車相当荷重におけるひび割れ幅0.15mmは、文献8)、9)から算出される耐久性許容ひび割れ幅(0.203mm)、および外観に対する許容ひび割れ幅(0.300mm)に比べて小さいが、乾燥収縮によるひび割れ幅を加算すると、上記の耐久性許容ひび割れ幅を超過する可能性がある。また、鉄道構造物で補修の目安としているひび割れ幅¹⁶⁾(0.2mm)を超過する。一方、床版材料としてSFECを用いると、PLCを用いる場合に比べてひび割れ本数とひび割れ幅を大幅に減少させることが可能である。ただし、防水工等のひび割れ対策を行う必要はあると考えられる。これらのひび割れ幅の定量的な評価が今後の課題である。
- ② 本研究で提案した構造は、設計荷重より大きな荷重レベルまで、床版と下弦材の合成効果が期待できる。床版材料にSFECを用いる場合、今回の実験結果からは、下弦材の荷重分担率として35%程度、床版の荷重分担率として65%程度を見込むことができると考えられる。ただし、設計用値の設定にあたっては、ひび割れ発生による荷重分担の変化、寸法効果等の影響を考慮して定める必要がある。

8. 結論

- (1) SRC床版を用いた下路トラス橋の提案と課題
床組をSRC床版形式とする複線下路トラス橋の試

設計から以下の結果を得た。

- ① SRC床版形式は、従来のコンクリート床版形式に比べ床高を少なくとも65cm程度低くできる。
- ② SRC床版形式の複線鋼トラス橋は、鋼床版形式のものに比べ約40%、従来のコンクリート床版形式に比べても約20%の鋼重を低減できる。
- ③ SRC床版形式は収縮目地を設けられない構造であり、主構作用によるコンクリート床版のひび割れの発生に留意する必要がある

(2) SRC 床版形式に用いる床版材料の検討

SRC床版形式に用いるコンクリート材料選定のための各種試験から、以下の結果を得た。

- ① SFCは、鋼繊維を混入することにより、圧縮強度、引張強度および曲げ強度に差はないものの、曲げ靱性係数が改善される。しかし、コンクリートの拘束収縮ひずみのバラツキは大きくなる。
- ② SFCに膨張材を混入したSFECは、SFCに比べ曲げ靱性係数、引張強度および曲げ強度が大きくなる。また、コンクリートの拘束収縮ひずみのバラツキも小さくなる。

(3) 載荷実験

試設計橋梁のSRC床版の約1/4模型の載荷実験から以下の結果を得た。

- ① 供試体PLRCは供試体SFRECに比べてひび割れ発生荷重が小さく、電車相当荷重以下でもかなりのひび割れが見られたのに対し、供試体SFRECでは、機関車相当荷重でもわずかなひび割れが発生した程度であった。
- ② 供試体PLRCでは、コンクリートのひずみが供試体SFRECに比べて小さな荷重でかつ階段状に増加した。一方、供試体SFRECでは、比較的滑らかに増加した。両供試体のこのような挙動の差は、鋼繊維の有無によるひび割れの発生挙動の違いに起因するものと考えられる。
- ③ SRC床版構造は引張荷重をコンクリートが分担する。特に供試体SFRECでは、比較的大きな荷重領域までコンクリートの分担が期待できる。

(4) 乾燥収縮実験

SRC床版の乾燥収縮実験から以下の結果を得た。

- ① 供試体D-PLRCでは乾燥初期からひび割れが発生し、それ以降材齢とともにひび割れの進展が認められたが、供試体D-SFRECでは局部的にひび割れが発生したものの、その後ひび割れ進展は確認されず、供試体D-PLRCと比較して非常に少ないものであった。
- ② 同一材齢におけるコンクリート収縮ひずみは、

供試体D-SFRECが供試体D-PLRCに比べ横桁上において若干小さくなったが、有意な差は認められなかった。

(5) 実験結果の実橋への適用

SRC床版形式を実橋に適用するための、実験結果から得られた知見を以下に示す。

- ① 供試体PLRCのひび割れ幅は、耐久性許容ひび割れ幅および鉄道構造物で補修の目安としているひび割れ幅を超過する可能性がある。一方、床版材料としてSFECを用いると、PLCを用いる場合に比べてひび割れ本数とひび割れ幅を大幅に減少させることが可能である。ただし、SFECを用いる場合にも、防水工等のひび割れ対策は必要と考えられる。また、ひび割れ幅の定量的な評価が今後の課題である。
- ② 床版材料としてSFECを用いた場合、下弦材の荷重分担率として35%程度、床版の荷重分担率として65%程度を見込むことができると考えられる。ただし、設計用値の設定にあたっては、ひび割れ発生による荷重分担の変化；寸法効果等の影響を考慮して定める必要がある。

参考文献

- 1) 谷口紀久、羽根良雄、菅原則之：鋼橋の騒音防止、日本国有鉄道 構造物設計事務所・監修 構造物設計資料、No. 38、pp. 24-27、1974. 6
- 2) 中野昭郎、田口雅隆、星川正明：スラブ軌道用トラス、日本国有鉄道 構造物設計事務所・監修 構造物設計資料、No. 33、pp. 11-15、1973. 3
- 3) 中野昭郎、阪本謙二：合成トラスの検討、日本国有鉄道 構造物設計事務所・監修 構造物設計資料、No. 41、pp. 14-18、1975. 3
- 4) 鉄道施設技術発達史編纂委員会：鉄道施設技術発達史、社団法人 日本鉄道施設協会、pp. 232、1994. 1
- 5) 一條昌幸、井口光雄、加藤進：床組の薄い道床式トラスの設計、日本国有鉄道 構造物設計事務所・監修 構造物設計資料、No. 63、pp. 6-9、1980. 9
- 6) 西村康之、下野一行、紀伊昌幸、矢島秀治：奈良線鴨川橋梁の設計と施工、橋梁と基礎、Vol134、No. 11、pp. 9-18、2000.
- 7) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物、1992. 10
- 8) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、pp. 110-117、1992. 10
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書、設計編、pp. 90、1996
- 10) 原田久、瀬野康弘、玉井真一、前田強司、増田芳

- 久：新交通システム走行路のひび割れ対策に関する実験的検討，第49回土木学会年次学術講演会，V-501，1994. 9
- 11) 瀨野康弘，前田強司，玉井真一，増田芳久，成行倬：新交通システム走行路の材料・構造に関する実験的検討，東急建設技術研究所報，No. 20，pp. 81-88，1994. 11
- 12) 社団法人 鋼材倶楽部 スチールファイバー委員会：スチールファイバーコンクリートの手引き〔第3版〕，pp. 2-3，pp. 50-58，1998. 10
- 13) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案），コンクリート・ライブラリー 第50号，pp. 58-61，1983. 3
- 14) 山田真幸，Satorn PENGPHON，三木千壽，市川篤司，入部孝夫：RC床版と鋼フランジ間のスラブアンカーによるせん断抵抗の評価，構造工学論文集，Vol. 47A，pp. 1161-1168，2001. 3
- 15) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修，補強指針，pp. 178，1987. 2
- 16) 日本国有鉄道 施設局・土木課：土木建造物取替の考え方，pp. 225-227，1984.

(2002. 6. 14受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON APPLICATION OF SRC STRUCTURE TO FLOOR SYSTEM IN RAILWAY THROUGH-TRUSS BRIDGE

Shuji YAJIMA, Atushi ICHIKAWA, Kiyomitsu MURATA and Shigeki KITAZONO

In the design of railway bridge crossing over road or river, the height of bridge from the lowest portion to the railway level is sometimes restricted by the height of the road or the high-water-level of the river. In order to satisfy these conditions, the authors propose an application of Steel-Reinforced-Concrete (SRC) slab structures to floor system in through-truss bridges. Since the behaviors of this type of bridges have not been clarified, pull-load and dry-shrinkage experiments of concrete slab structure are conducted in this study. These experiments demonstrate the location of cracks in the slab concrete, their developing patterns, and the axial assignment-force of lower chord member.