

鋼鉄道下路トラス橋 SRC 床版に対する 鋼繊維補強コンクリートの施工性および強度特性に関する研究

A study on construction difficulty and strength characteristics of Steel Fiber Reinforced Concrete
for SRC Floor Slab in Railway Through-Truss Bridge

矢島 秀治* 北園 茂喜** 市川 篤司*** 村田 清満**** 原 夏生*****
Shuji YAJIMA, Shigeki KITAZONO, Atushi ICHIKAWA, Kiyomitsu MURATA and Natsuo HARA

- * ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 土木設計部 (〒532-0011 大阪市淀川区西中島 5-4-20)
** 工修 西日本旅客鉄道株式会社 建設工事部 (〒530-8341 大阪市北区新発田 2-4-24)
*** 工博 財団法人 鉄道総合技術研究所 研究開発推進室 (〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)
**** 工博 財団法人 鉄道総合技術研究所 企画部 (〒185 東京都国分寺市光町 2-8-38)
***** 工博 前田建設工業(株) 技術本部 技術研究所 (〒179-8914 東京都練馬区旭町 1-39-16)

In the design of railway bridges which cross over roads and rivers, the height of the girder is often restricted. In order to decrease the girder height under such condition, the authors propose to use a Steel-Reinforced-Concrete (SRC) floor slab in railway through-truss-bridges. If this structure is adopted, however, the SRC floor slab sustains tensile forces of lower chord members to generate cracks. Therefore, steel fiber reinforced concrete should be used as the material for the SRC floor slab. This paper describes the construction difficulty and the strength characteristic of steel fiber reinforced concrete which is applied to the SRC floor slab.

Key Words : Steel-Reinforced-Concrete (SRC) slab, railway through-truss-girder, steel fiber reinforced concrete,

1. はじめに

最近、鉄道では、サービスの向上を目指し、列車の高速化の動きが活発である。列車の高速運転のための有効な方法の一つに、縦断線形の緩勾配化がある。線路勾配を緩やかに設定するためには、橋梁において、交差する河川条件や道路条件を満足した上でレールレベル(R.L.)から桁最下端の寸法を抑えることが重要である。

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、R.L.から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、バラスト軌道、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。従来の閉床式は、鋼床版床組構造（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とともに維持管理上有利な鉄筋コンクリート床版床組構造（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。

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高さをさらに減らすことを可能とする構造として、床組にSRC構造（以下、SRC床版）を利用することを提案した¹⁾。本床組構造の適用性について、床版が橋軸方向に引張力を受けた場合のコンクリートのひび割れ安全性を確認するために、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²⁾。その結果、床版材料として膨張材を混入した鋼繊維補強コンクリート（以下、SFRC）を使用することにより、床版のひび割れ幅は許容値以下に制御できることがわかった。

SFRCは、普通コンクリート（以下、PLC）に比べて、ひび割れの抑制、コンクリートの剥落防止、曲げ靱性能などにおいて優れている反面、フレッシュコンクリートの品質確保、施工性、充填性等に問題が多い。特に、SRC床版形式は限られた空間に横桁と鉄筋が複雑に交差した構造になり、またフレッシュコンクリートの圧送距離が数百mを超えるなど、構造上および施工上コンクリートの品質を低下させる要因があることから、SRC床版としての性能を発揮させるためには、SFRCを十分充填し、かつ鋼繊維を十分に分散させることが重要になる。

筆者らは、鉄道下路トラス橋を対象に、SRC床版を用

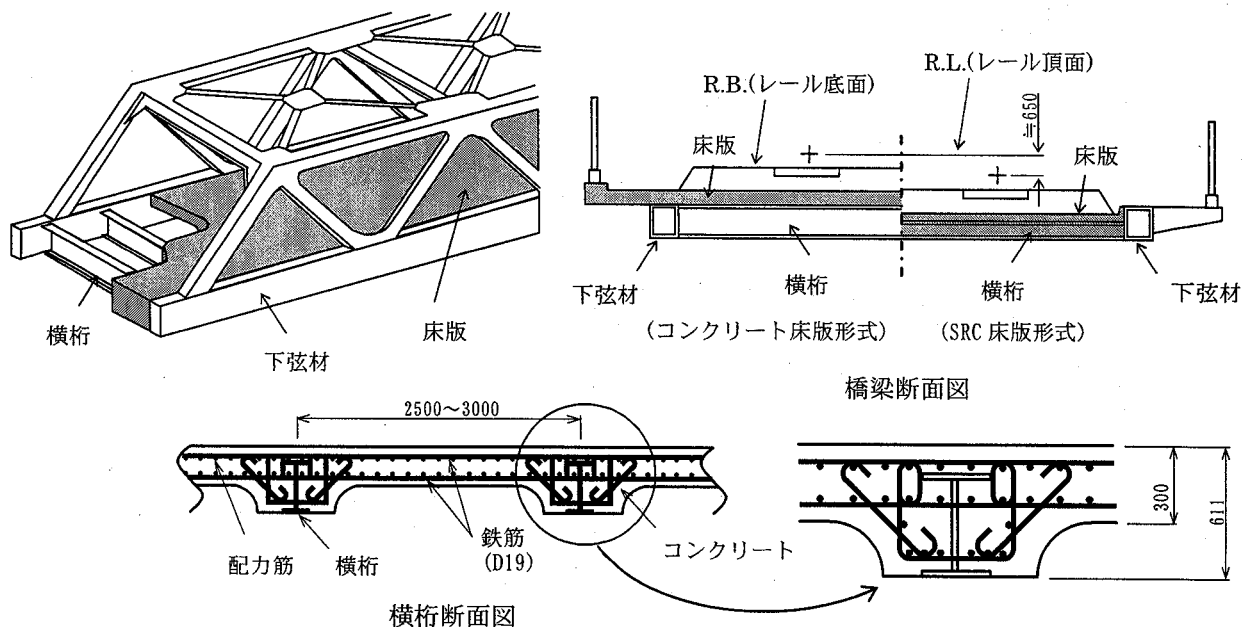


図-1 橋梁概念図と床組構造

いた新しいタイプの床組構造の開発と設計手法を構築することを目指しており、その研究の一環として、鋼繊維の混入方法、SFRCのポンプ圧送性実験に加え、実物大のSRC床版模型を使用したコンクリートの充填性および鋼繊維分散性実験、およびSFRCの各種強度特性試験を行った。本論文は、これらの実験、およびその結果に基づき鋼鉄道下路トラス橋SRC床版形式にSFRCを適用する場合の施工管理手法と強度特性について論じたものである。

2. SRC床版形式の提案、課題および検討方法

2.1 SRC床版形式の提案

筆者らの提案するSRC床版形式は、床組の高さをできる限り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間隔で配置する構造である。横桁間は橋梁支点付近の一部を除き、床版厚30cmのRC構造である。

実橋を想定した複線連続トラス橋を対象に試設計を実施し、本形式を従来形式と比較した。その概念図および床組構造を図-1に示す。

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ことが明らかになった。

- ① 従来のコンクリート床版形式において、単線橋梁並みに床高を抑えたとしても、SRC床版はその床高に比べ少なくとも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-2)。
- 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

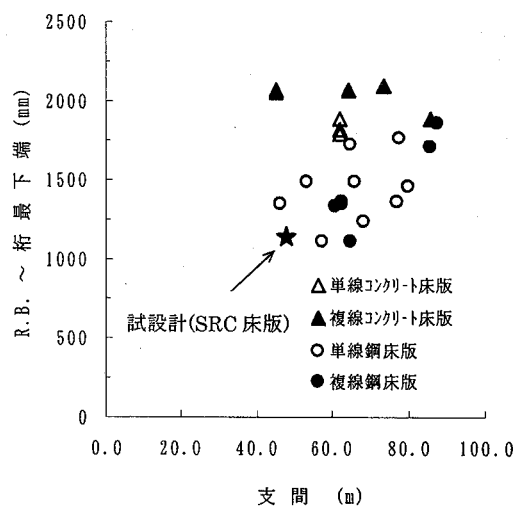


図-2 下路トラスの支間—(R.B.~桁最下端)

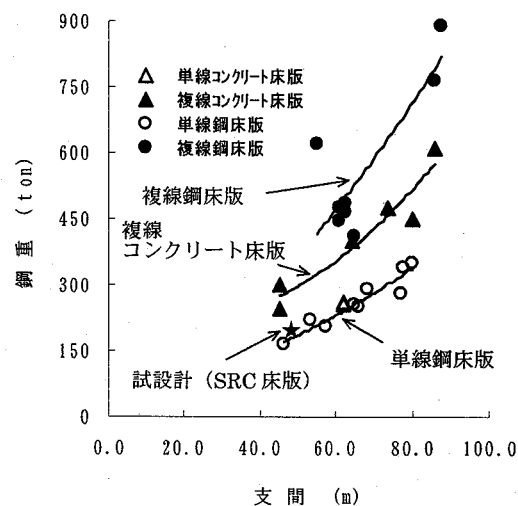


図-3 下路トラスの支間—鋼重

も約 20%の鋼重を低減できる（図-3）。

- 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式の床組構造に比べ、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（図-1）。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。
- 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期待できる。

2.2 SRC 床版形式の課題

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、主構の挙動がコンクリート床版に及ぼす拘束度（以下、主構作用）が大きく、主構と床版との合成効果が不明確であることに加え、コンクリート床版のひび割れの発生に対する安全性の確認が必要である。しかし、現在のところ、これらの問題に対する明確な評価方法が見あたらない。

そこで、下弦材が引張荷重を受け床版に軸引張力が作用する場合、および下弦材と横桁により拘束された床版コンクリートが乾燥収縮を受けた場合の下弦材、鉄筋、およびコンクリートの軸力分担率、ならびにひび割れ発生位置とひび割れ進展状況を明らかにするために模型供試体を用いた実験を行った。その結果、床版材料として SFRC に膨張材を混入した鋼繊維補強膨張コンクリートを用いることにより SRC 床版形式の実橋への適用が可能と判断した²⁾。

今後、鉄道橋では河川改修に伴う橋梁改築工事が多く予定されており、SRC 床版形式のように R.L. から桁最下端を低く抑えた床組構造の適用が強く要請されている。しかし、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ることに加え、鉄筋を含む床版の鋼材比が、橋軸方向約 5.2%，橋軸直角方向約 2.6%（橋軸方向鉄筋比 1.54%，下弦材鋼材比 3.67%，橋軸直角方向鉄筋比 0.56%，横桁鋼材比 2.0%）と、一般のコンクリート床版形式に比べ、橋軸方向鉄筋比が約 150%，横桁を含む橋軸直角方向鋼材比が約 300%と大きくなる。さらに、コンクリート打設時のポンプ圧送距離が数百 m に及ぶことも考えられる。したがって、SRC 床版に SFRC を用いる場合には、フレッシュコンクリートの品質確保、良好な充填性と鋼繊維の分散性を得るための品質管理および施工管理手法を確立する必要がある。

2.3 検討方法

上記の課題を解決するために、本研究では品質に影響を及ぼす事項を、ポンプ圧送性などのコンクリート打設準備時に検討すべきものと、充填性など床版へのコンクリート打設時に検討すべきものとに大別し、実験による

検討を行った。前者を施工前実験、後者を施工性実験と呼ぶ。また、鋼繊維に関し、SF30（ $\Phi 0.6\text{mm}$ ， $L=30\text{mm}$ ，鋼繊維容積混入率 1.0%）および鋼繊維長を長くして混入量を減らした SF50（ $\Phi 0.7\text{mm}$ ， $L=50\text{mm}$ ，鋼繊維容積混入率 0.75%）の施工性および強度特性についても検討を行った。

3. 施工前実験

SFRC を鋼鉄道橋の床版材料として利用した例が少ないことに加え、品質管理および施工管理の方法は確立されていない。したがって、施工に際しては、フレッシュコンクリートの品質および施工性確保のための施工条件等を予め検討しておく必要がある。このため、SFRC を適用した SRC 床版の施工性について、鋼繊維攪拌時間の設定およびポンプ圧送によって SFRC の品質がどのような影響を受けるかについて実験を行った。

3.1 実験概要

(1) 実験に用いた材料

実験に用いた SFRC の配合を表-1 に示す。本実験では鋼繊維に SF30 を使用した。

表-1 実験に用いたコンクリートの配合

配合	鋼繊維 混入率 (%)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							混和剤	鋼繊維 (kg/m ³)	スランプ (cm)
					W	C	膨張材	S1	S2	G	air			
PL	—	25.0	48.0	51.8	175	335	30	710	177	832	4.5	6	—	—
SF30	1.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	80	12±2.5
SF50	0.75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	60	—

スランプ、空気量は鋼繊維現場添加後の値

(2) 攪拌時間に関する実験

ベースコンクリート（生コン）到着直後にスランプおよび空気量を測定し、その後、鋼繊維を所定量投入する。アジテーター車のドラムへ鋼繊維を投入後、攪拌時間を 3 段階（6 分、4 分、2 分）設定し、SFRC のスランプ、空気量および鋼繊維混入率⁴⁾を測定した。なお、鋼繊維の投入は分散性を考慮し、鋼繊維投入用エア-圧送装置を使用した。また、鋼繊維投入時間は 19 分～28 分を要した。

攪拌時間がフレッシュコンクリートの品質に及ぼす影響を把握するために行った実験手順と各ステップにおける試験種別およびその方法は以下のとおりである。

1) ベースコンクリートに対する評価

スランプ、空気量を測定し、試験練り時の性状と比較する。

2) 鋼繊維の投入方法

鋼繊維が一定量投入されるように図-4 に示す鋼繊維投入用エア-圧送装置を使用する。また、投入中は鋼繊維がドラム内で 1 箇所に固まらないように、ドラムを中速で回転させ続ける。

3) SFRC の攪拌方法

鋼繊維投入完了後、アジテーター車のドラムを一定時間（6 分、4 分、2 分）高速で回転させる。攪拌終了後、アジテーター車から 1.0m³、2.5m³、4.0m³ 程度を排出した

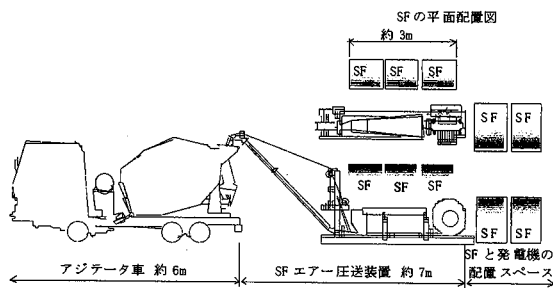


図-4 SF エアー圧送概要

ところで、その都度 50 リットル程度を練り船に排出し、スランプ、空気量、鋼繊維混入率を測定する。このときの鋼繊維混入率は、JSCE-F554「鋼繊維補強コンクリートの鋼繊維混入率試験方法」の洗い分析試験方法⁵⁾に準拠して求める。

(3) ポンプ圧送性に関する実験

鋼繊維を(2)で選定した時間攪拌した SFRC を、全長 150 ～180m 程度の鋼鉄道トラス橋の床組コンクリート打設作業を模擬した水平換算距離 227m のポンプ圧送管 (圧送管内径 5 in) により圧送し、ポンプ圧送性を調査した。

なお、性状の判定は、圧送量 5m³ 中、2.5m³ 排出時にポンプ筒先から採取した SFRC のスランプ(12±2.5cm)、空気量(4.5±1.5%)および鋼繊維混入率により行うこととし、鋼繊維混入率に対する基準は 2 回の測定値が前項の洗い分析試験方法に示される制限値を満足するか否かにより判定した。

3.2 実験結果

(1) 攪拌時間が SFRC の品質に及ぼす影響

1) フレッシュ性状の経時変化

図-5 にスランプおよび空気量の経時変化を示す。図中の経過時間の 0 は、ベースコンクリートの性状試験結果である。攪拌直後のスランプロスは攪拌時間によって異なるが、8.5cm～10.5cm であった。また、空気量の増加は、2.0%～3.3% であった。なお、図中 () 内の数値は攪拌直後のスランプロスおよび空気量の増加を示す。

ベースコンクリートに鋼繊維を混入することによるスランプロスは、攪拌時間 2 分および 6 分に比べ、4 分が小さいが、いずれの場合も施工性に影響を与えるほどではない。本実験において、攪拌時間 4 分のスランプロスが他に比べて小さいのは、ベースコンクリートのスランプが他に比べて大きかったことも要因と思われる。

空気量の変化は、攪拌時間 4 分が他に比べ大きくなっているものの、いずれのケースにおいても空気量の許容値(4.5±1.5%)を満足している。今回の実験で攪拌直後の空気量の増加が最も少なかったのは、攪拌時間 2 分の場合であった。

2) 鋼繊維混入率

表-2 に攪拌時間の違いによる平均鋼繊維混入率および

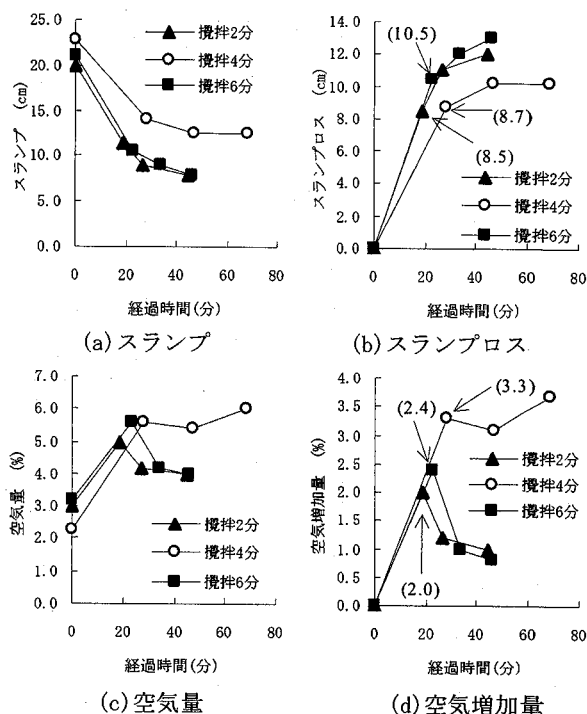


図-5 スランプおよび空気量の経時変化

表-2 鋼繊維混入率および混入率差 (%)

抽出部位	平均混入率 $\bar{V}_f = 1/2 (V_{f1} + V_{f2})$			混入率差 $(V_{f1} - V_{f2})$		
	2分	4分	6分	2分	4分	6分
前	1.03	0.95	1.03	0.75	3.62	5.32
中	1.05	1.07	1.03	2.83	4.22	0.26
後	1.06	0.96	0.96	3.40	1.28	0.13
平均	1.05	0.99	1.01	2.33	3.04	1.90

混入率差の一覧を示す。

いずれのケースにおいても、2 サンプルの平均混入率は 1 % 前後であり、当初計画した値にほぼ等しく、ドラム部位によるバラツキも認められない。

混入率の差は、攪拌時間 6 分の場合のドラム前部 (1.0 m³ 排出時) から採取した場合を除く全てのケースで、洗い分析試験方法に定める制限値 (5%) を下回っている。

以上より、鋼繊維をドラムに投入後の攪拌時間を長くすると、スランプロス、空気量の増加および鋼繊維混入率のバラツキが大きくなる。したがって、攪拌時間は 2 分程度でよいと考えられる。

(2) ポンプ圧送性が SFRC の品質に及ぼす影響

(1) に示す実験の結果から、攪拌時間を 2 分としてポンプ圧送性について検討した。表-3 に実験結果を示す。スランプおよび空気量の経時変化は、図-5 と同様の傾向であった。また、ポンプ圧送後の鋼繊維混入率についても表-2 に比べて差が認められない。これらの結果から、ポンプ圧送前と圧送後における SFRC の性状にそれ程変化はなく、ポンプ圧送が SFRC の品質に及ぼす影響は少ないと考えられる。

表-3 ポンプ圧送実験における性状比較

種 類	経過時間 (min)	スランプ (cm)	空気量 (%)	SF混入率 (%)			
				Vf1	Vf2	Vave	ΔVf
PLC	0	21.00	3.20				
SF30圧送前	15	10.50	5.60	—	—	—	—
SF30圧送後	35	8.00	4.00	1.05	0.98	1.01	0.037

4. 施工性実験

前述したように、SRC 床版は一般のコンクリート床版に比べて鋼材比が大きくなる。このため、SRC 床版への SFRC の適用に際しては、コンクリートが充填されない、あるいは鋼繊維が分散しないなどの問題が考えられる。

そこで、コンクリートの締め固め時間と鋼繊維の分散性、および SRC 床版への SFRC 充填性についての実験を行った。

4.1 実験概要

(1) 実験に用いた鋼繊維

SFRC を橋梁の床版材料として使用した例は極めて少ないが、SF30 (鋼繊維長 30mm, 混入量 80kg/m^3) が用いられた例がある³⁾。SFRC は鋼繊維が長い方がひび割れ抑制効果、曲げ強度、曲げ靱性係数が大きいことが知られており、その意味では、床版には長い鋼繊維を用いるとひび割れ抑制効果が大きい。したがって、長い鋼繊維を混入した SFRC は短い鋼繊維を混入したものに比べ、一定の性能を確保するために必要な鋼繊維混入量を低減できるものと考えられる。しかし、鋼繊維が長くなることにより、充填性や鋼繊維の分散性等の施工性が低下すると考えられる。

このようなことから、SF30 に加え、SF50 について両者の比較検討を行った。

(2) SFRC の充填性に関する実験

SFRC の充填性と強度特性は、締め固め時間に影響されると考えられることから、締め固め時間として 10 秒と 90 秒の 2 段階を設定し、実物大の配筋模型床版を用いた SFRC の打設実験を行った。図-6(a)に示すように、模型床版には、鋼繊維と締め固め時間の設定が各々異なる 4 区間 (A 区間: SF30, 締め固め 10 秒, B 区間: SF30, 締め固め 90 秒, C 区間: SF50, 締め固め 10 秒, D 区間: SF50, 締め固め 90 秒) を設け、順次コンクリートを打設した。なお、締め固めには高周波パイプレーターを使用し、図-6(b)に示す締め固め位置 (A~D の各区間 2 箇所) において定点締め固めを行った。その際、各区間において所定量のコンクリート (各区間約 0.34m^3) を投入し、あらかじめ突き棒を用いて、ある程度区間全体に SFRC を行きわたらせた。SFRC 打設約 2 週間後に、図-6(a)に示す A-A' ~ D-D' をワイヤーソーにより切断し、鉄骨および鉄筋周辺を中心にコンクリートの充填性を調査した。

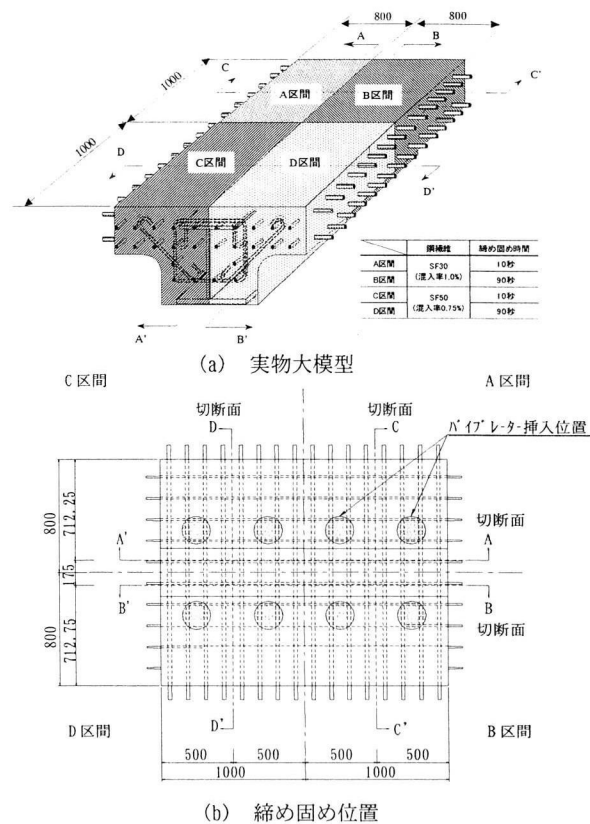


図-6 施工性実験供試体

(3) 鋼繊維の分布性状に関する実験

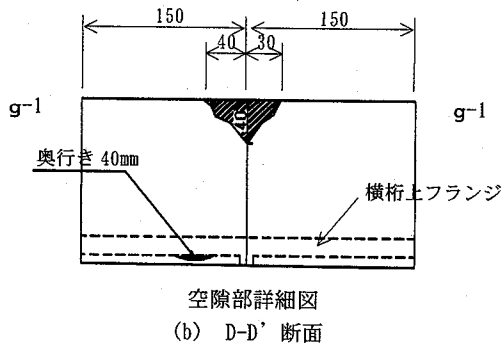
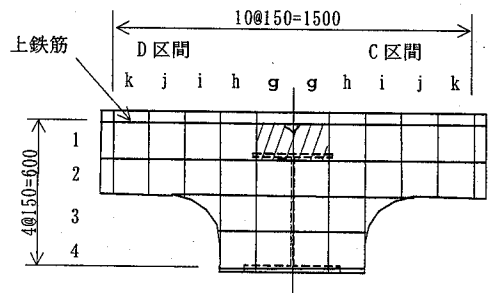
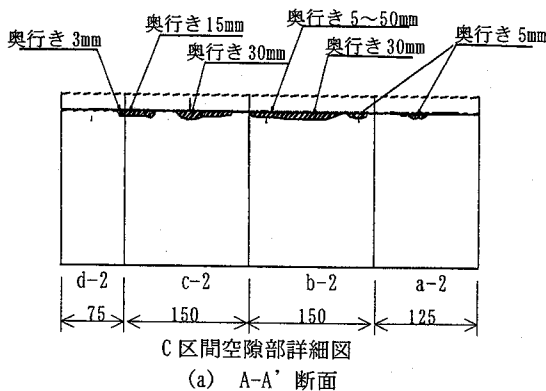
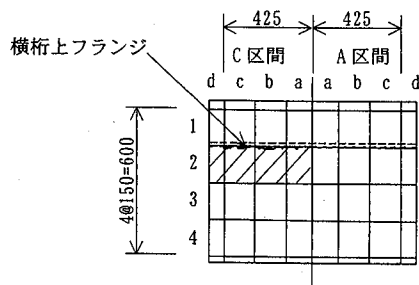
(2)において SFRC の充填性の調査を行った。図-6(a)に示す供試体切断面 A-A', B-B', C-C', D-D' の詳細を図-8に示す。観察エリアの分割は、横桁鉄骨周辺部等への未充填の可能性を考慮し、1 観察エリア (1 メッシュ) の面積が一定になるようにした。これらの観察エリア毎の鋼繊維切断本数 (コバの数) を測定することにより鋼繊維の分布状況を把握し、部位別の鋼繊維分散性状を比較した。

4.2 実験結果

(1) SFRC の充填性

図-7(a),(b)に C 区間および D 区間の充填状況を示す。

図-7(a)に示すように、横桁フランジ裏面付近などに若干の空隙 (厚さ 3~8mm) がみられた。他の区間も C 区間に比べ小さいものの、ほぼ同様な位置に空隙が見られた。一方、鉄骨周辺部を除きいずれの区間においても、SFRC は極めて密実であった。今回行った打設実験は締め固め時間の差による充填性の影響を調査するためのもので、締め固め箇所を 1 区間当たり 2 箇所に限定しパイプレーターを移動しなかったこと、および、締め固めに先立ち型枠上面までコンクリートを投入したために、横桁上フランジ下面付近にわずかな空隙が生じたと考えられ、このことを考慮すれば、SF30 と SF50 の鋼繊維長の違いによる充填性の差は殆ど無いものと考えられる。

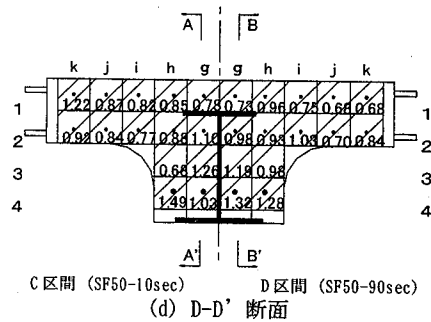
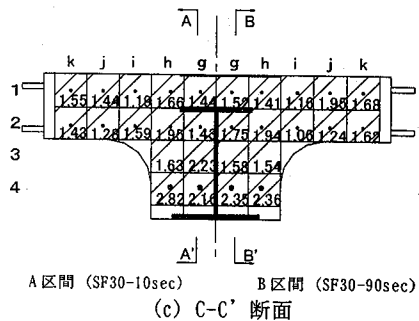
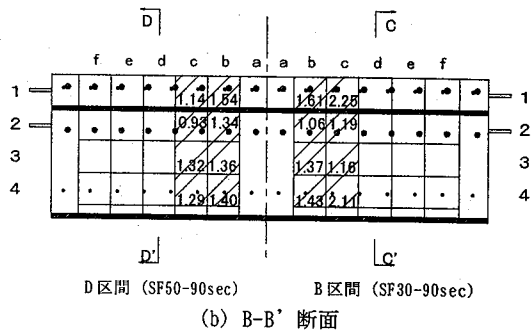
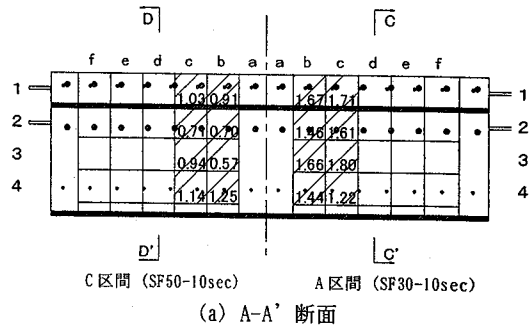


注) A-A', B-B', C-C', D-D' 断面は図-6 (a) に示す

図-7 コンクリート充填状況

締め固め時間 90 秒では空隙が生じたにもかかわらず、10 秒では空隙が生じなかったものもあった(図-7(b))が、その他の断面では締め固め時間と充填性の差は認められなかった。なお、C 区間と D 区間境界部の上鉄筋下部の空隙は、区間を区分するための仕切り板等の影響によるものである。

以上のことから、鋼繊維の種類および締め固め時間の違いが充填性に及ぼす影響は少ないものと考えられる。すなわち、コンクリートの充填性に関しては、1 箇所あ



図中の各数値は単位面積当たりの鋼繊維本数(本/cm²)
斜線部が観察位置を示す

A-A', B-B', C-C', D-D' 断面は図-6 (a) に示す

図-8 各断面における鋼繊維分布率

たり 10 秒程度の締め固めで十分であり、空隙の発生を防止する観点からは、横桁上フランジ位置でコンクリートを一度打ち止め、横桁フランジ下部にパイプレーターを挿入するなど、適切な打ち上げ高さにおいて、十分な締め固めを行うことが重要と考えられる。

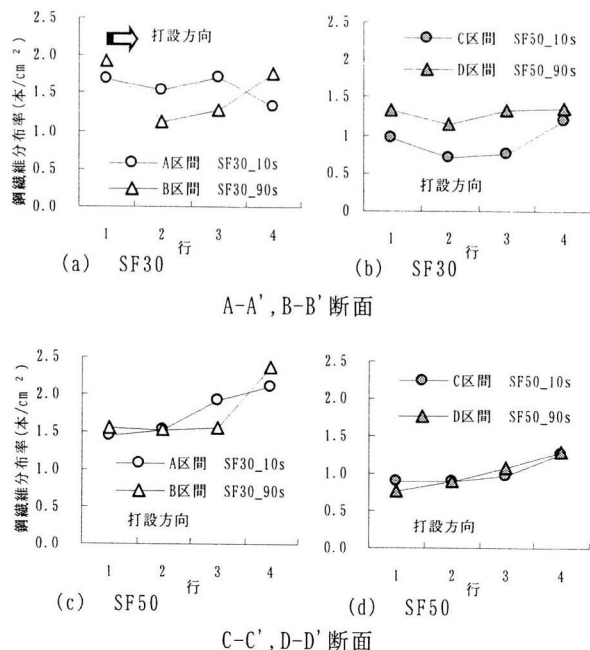


図-9 鋼繊維分布状況比較

(2) 鋼繊維の分布性状

本測定では図-8 に示す領域の内、メッシュ内に数値が記された範囲の鋼繊維本数をカウントし、単位面積あたりの本数を鋼繊維の分布率とした。

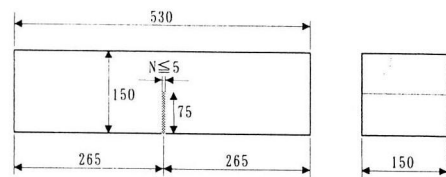
図-8 に測定対象エリアの鋼繊維の分布率を示す。また、本図をもとに作成した締め固め時間別鋼繊維分布状況比較図を図-9 に示す。

図-8(a),(b)では、横桁上フランジ下面の鋼繊維分布率が若干小さくなっているものの、図-8 (c),(d) においてはこの傾向は認められない。また、図-8(c) および図-9(a) (B 区間)から、SF30 では締め固め時間 90sec の横桁下フランジ上面付近の 4 g エリアの鋼繊維分布率が締め固め時間 10 秒のものに比べて大きい。ただし、B 区間 (SF30, 締め固め時間:90 秒) 4h エリアにおいては、A 区間に比べ鋼繊維分布率が小さくなっている。図-9(c) においても A, B 両区間の鋼繊維分布率に大きな差はなく、締め固め時間と鋼繊維分布状況に相関はない。また、SF50 においても締め固め時間による分布率の偏りは認められない。

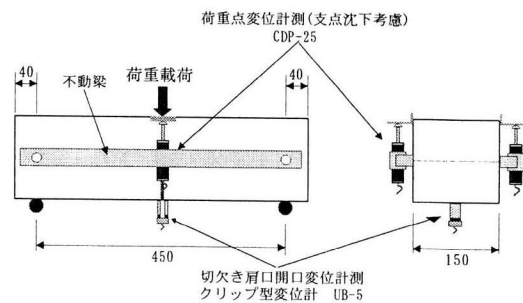
すなわち、鋼繊維長 50mm および 30mm, ならびに締め固め時間 10 秒および 90 秒における鋼繊維の分布率については有意な差が認められない。

5. 鋼繊維長を変化させた場合の強度特性実験

4 章に述べたように、鋼繊維長を 30mm および 50mm にしても、SFRC の施工性に及ぼす影響は小さい。SF50 を橋梁の床版へ適用した例は、これまで殆どない。これは SF50 の使用実績が SF30 に比べて少ないことに加え、鋼繊維の分散性等施工の面において問題が多いと考えられていたためと思われるが、4 章に示したように両者には



(a) 試験用供試体



(b) 試験計測方法

図-10 破壊エネルギー試験

とんど差がないことが明らかになった。

そこで、両者の強度特性について比較実験を行った。

5.1 実験概要

主構作用を受ける SRC 床版に SFRC を採用する主な理由は、SFRC のひび割れ分散効果によるひび割れ幅制御と、SFRC の引張応力作用時の分担力増加に伴う、鋼とコンクリートの合成断面耐力の増大を期待したためである。

従って、これらに対する特性を評価するため、従来の PLC において材料の性能評価のために行う圧縮強度試験に加え、曲げ試験および破壊エネルギー試験を行った。

(1) 圧縮強度試験、曲げ強度および曲げタフネス試験

ベースコンクリート、SF30, および SF50 に対し、圧縮強度試験供試体各 3 体、SF30, および SF50 の曲げ強度試験供試体各 12 体を作製し、コンクリート材齢 28 日において、圧縮強度、曲げ強度および曲げタフネス試験を実施した。ベースコンクリートに対する圧縮強度試験は JIS A 1108 に、SFRC に対する圧縮強度、曲げ強度および曲げタフネス試験は JSCE-G 551-1983⁴⁾ および JSCE-G 552-1983⁴⁾ に準拠した。なお、曲げ強度試験供試体のうち 4 体は JSCE-G552-1983 に準拠するが、鋼繊維の配向および鋼繊維の沈降の影響を考慮して、他の供試体は、正規に供試体を作製した後、鋼製型枠外周部を十分に (60 秒程度) バイブレーターで締め固め、それぞれ 4 体ずつ打設面を上および下にして載荷を行った。

(2) 破壊エネルギー試験

ベースコンクリート(PLC), SF30, SF50 について各 4 体の供試体 (150×150×530mm) を作製し、破壊エネル

表-4 鋼繊維補強コンクリートの強度試験結果

試験体	圧縮強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)		曲げタフネス (N/mm^2)
		試験値	参考値 ⁷⁾	
SF30 (PLC) ^{*1}	46.4	-	-	-
SF30		5.75		4.26
SF30(打設面上)	39.9	6.18	4.90	3.94
SF30(打設面下)		5.29		4.30
SF50 (PLC) ^{*2}	47.6	-	-	-
SF50		8.26		6.97
SF50(打設面上)	47.2	8.26	5.49	6.70
SF50(打設面下)		7.66		6.33

*1: SF30混入時ベースコンクリート

*2: SF50混入時ベースコンクリート

ギー試験を実施した。試験に用いた供試体を図-10(a)に示す。供試体は鋼製型枠を使用して製作し、脱型後(材齢14日経過後)にコンクリートカッターによって供試体中央に切欠きを設け、載荷試験当日まで標準養生を行った。また、載荷試験は文献(6)に準拠して、図-10(b)に示す方法により行った。載荷はプレーンコンクリートの破壊エネルギー試験法(案)に準拠して、コンクリートの材齢28日経過後に実施した。また、載荷は、供試体中央部切欠き部のひび割れ開口量(CMOD)を制御することにより行い、その載荷速度は鋼繊維補強コンクリートで0.005mm/sec、プレーンコンクリートで0.0015mm/secとした。

5.2 実験結果

(1) 圧縮強度、曲げ強度および曲げタフネス

ベースコンクリートおよびSFRC(SF30,SF50)に対する圧縮強度試験(3供試体の平均値)、およびSF30とSF50における曲げ強度および曲げタフネス試験結果(4供試体平均値)を表-4に示す。

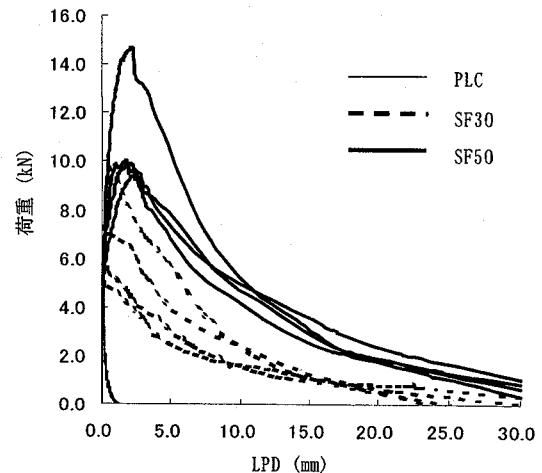
圧縮強度は、いずれの供試体(材齢28日)においても設計基準強度 $27\text{N}/\text{mm}^2$ を上回っているが、SF30についてはベースコンクリートおよびSF50に比べ約15%低下した。これから、鋼繊維混入による空気量の増加によって設計基準強度を下回らないようにPLCの圧縮強度を設定する必要があると考えられる。

SF50はSF30に比べて曲げ強度で約1.5倍、曲げタフネスで約1.6倍となっている。単位体積あたりの鋼繊維混入量が同一の場合には、鋼繊維の長いものは短いものに比べ、曲げ強度および曲げタフネスが大きくなることから知られているが、鋼繊維の長さを30mmから50mmに変更し、鋼繊維混入量を $80\text{kg}/\text{m}^3$ から $60\text{kg}/\text{m}^3$ としても、SF50の圧縮強度、曲げ強度および曲げタフネスは、SF30を上回った。また、SF30およびSF50の曲げ強度は、圧縮強度から算定される曲げ強度(表中の参考値⁷⁾)に比べ大きい値を示した。

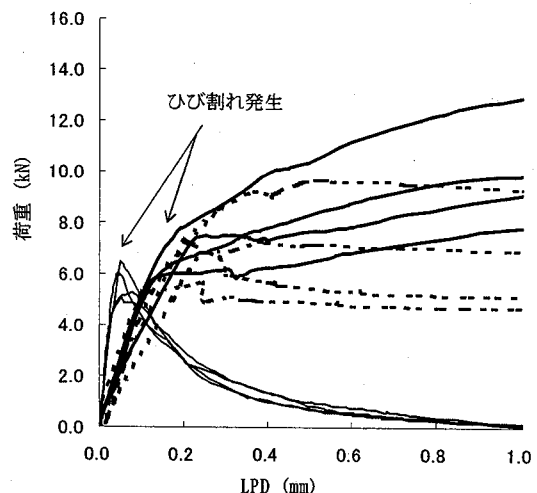
鋼繊維の配向および鋼繊維の沈降の影響を考慮して、再振動を与えた供試体の打設面を上にしたものと、下にしたものについて行った曲げ試験結果によれば、SF30は打設面を上にした方が下にしたものに比べ約15%、SF50は同約8%曲げ強度が大きくなった。しかし、曲げタフ

表-5 破壊エネルギー試験結果一覧

試験体	PLC	SF30	SF50
破壊エネルギー (N/mm^2)	0.164	5.34	12.15



(a) 荷重-LPD (0-30)



(b) 荷重-LPD (0-1)

図-11 荷重-載荷点変位

ネスについては両者に有意な差が認められなかった。通常の施工においてはコンクリート打設方向による大きな材料特性値のバラツキはないものと思われる。

(2) 破壊エネルギー

表-5に破壊エネルギー試験の結果を示す。これによれば、SFRCはPLCに比べ非常に大きな破壊エネルギーを有していることがわかる。また、SF50の破壊エネルギーはSF30に比べ2倍以上になっており、破壊エネルギーは鋼繊維長が長い方が大きくなることからわかる。すなわち、鋼繊維長の長いSF50はSF30に比べ力学特性上有利であるといえる。

破壊エネルギー試験は引張軟化曲線を求め、床版の解析に用いる材料の構成則を設定するためのものであると位置付けられる。しかし、載荷荷重と図-10(b)に示す支点沈下を考慮した荷重載荷点における変位(LPD)の関係は、

破壊エネルギーの大小を把握できるため、SFRC のひび割れ幅抑制と引張応力作用時の床版分担力の大小を評価する指標の一つになると考えられる。これらの関係を図-11 に示す。ただし、PLC の荷重点変位(LPD)については、文献 6)に従い、切欠き肩口開口変位計により計測された肩口開口変位 (CMOD) の値を 0.75 倍したものを LPD 値とした。

なお、LPD 領域を 30.0mm までとしたものを図-11 (a) に、また、それを拡大し同 1.0mm としたものを図-11 (b) に示す。

PLC は載荷荷重の増加とともに、LPD が約 0.05mm に達した後、ひび割れ発生と同時に急激に結合力が低下している。一方、SFRC は LPD が 0.1mm~0.2mm でひび割れが発生するもののこの間での結合力の低下はなく、LPD が 2.0mm を超えたあたりから結合力が低下し始める。特に、SF50 はひび割れ発生後も一定領域において載荷荷重の増加とともに結合力も増加している。すなわち、SFRC は PLC に比べ、ひび割れ発生後の結合応力が大きくひび割れ発生後の引張抵抗力も大きい。また、SFRC に関しては、鋼繊維長が長くなる (30mm→50mm) と混入量が減少 ($80\text{kg/m}^3 \rightarrow 60\text{kg/m}^3$) しても結合応力が大きくなる。

6. 結論

(1) 施工前実験

SFRC を適用した SRC 床版の施工性について、鋼繊維攪拌時間の設定およびポンプ圧送性から SFRC の品質にどのような影響を及ぼすかについて実験を行い、以下の知見を得た。

1) 攪拌時間が SFRC の品質に及ぼす影響

鋼繊維をドラム投入後に行う高速攪拌の時間が長くなると、スランプロス、空気量の増加および鋼繊維混入率のバラツキが大きくなり、高速攪拌時間は 2 分程度でよい。

2) ポンプ圧送性

全長 150~180m の鋼鉄道トラス橋を想定した SFRC のポンプ圧送試験を実施し、ポンプ圧送前後における SFRC の性状はそれ程変化がなく、ポンプ圧送が SFRC の品質に及ぼす影響は少ない。

(2) 施工性実験

コンクリートの締め固め時間と鋼繊維の分散性、および SRC 床版への SFRC 充填性についての実験を行った。

その結果、コンクリートの充填性に関しては、1 箇所あたり 10 秒程度の締め固めで十分であり、空隙の発生を防止する観点からは、横桁上フランジ位置でコンクリートを一度打ち止め、横桁フランジ下部にバイブレーターを挿入するなど、適切な打ち上げ高さにおいて、十分な締め固めを行う必要がある。

また、鋼繊維長 50mm および 30mm、ならびに高周波

バイブレーターの締め固め時間 10 秒および 90 秒における鋼繊維の分布率については有意な差が認められない。

(3) 強度特性実験

SRC 床版に適用する SFRC が具備すべき強度特性として、PLC において行う圧縮強度試験に加え、曲げ試験および破壊エネルギー試験を行い、以下の知見を得た。

1) 圧縮強度、曲げ強度および曲げタフネス

鋼繊維長の違い(SF30 と SF50)による SFRC の圧縮強度の差は認められたものの、いずれの供試体においてもその圧縮強度は設計基準強度を上回った。

また、鋼繊維の長さを 30mm(SF30)から 50mm(SF50)に長くし、鋼繊維混入量を 80kg/m^3 から 60kg/m^3 に減少させても、後者は前者に比べて曲げ強度で約 1.5 倍、曲げタフネスで約 1.6 倍となる。

2) 破壊エネルギー

SFRC は PLC に比べ非常に大きな破壊エネルギーを有している。さらに、SF50 の破壊エネルギーは SF30 に比べ 2 倍以上となっており、破壊エネルギーは鋼繊維長が長い方が大きい。

すなわち、PLC に比べ鋼繊維補強コンクリートは主構作用に伴う引張力を受ける SRC 床版に適用する場合に、ひび割れに対する安全性が高められる。特に、鋼繊維長の長い SF50 は SF30 に比べ、よりその効果が大きくなる。

謝辞：本論文の破壊エネルギーの試験方法および引張軟化曲線の算出方法に関しては、岐阜大学工学部 土木工学科 内田裕市助教授、国枝稔助手のご指導・ご助言を頂くとともに、多直線近似法による引張軟化曲線の算出用プログラムの提供を受けた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 西村，下野，紀伊，矢島：奈良線鴨川橋梁の設計と施工，橋梁と基礎，2000.11，pp.9~pp.18
- 2) 矢島，市川，村田，北園：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，土木学会論文集投稿中，2002
- 3) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)，第 50 号，昭和 58 年 3 月 (1983.3)
- 4) (社)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]，1998.10，pp.50~pp.52
- 5) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書，2001.5，pp.4~pp.9，pp.401~pp.405
- 6) 建設省 近畿地方建設局：橋梁床版上面増厚工法設計・施工マニュアル(案)，1999.4，pp.96
- 7) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，丸善(株)，1999.10 pp.58
(2002年9月13日受付)